

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Institut dopravy

**Posouzení energetiky provozu na traťovém úseku
po jeho elektrifikaci**

Analysis of Energy Consumption on Railway Track
Section after Its Electrification

Student:

Denis Tomíček

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Jaromír Široký, Ph.D.

Ostrava 2019

Zadání bakalářské práce

Student: **Denis Tomíček**

Studijní program: **B2341 Strojírenství**

Studijní obor: **2301R003 Dopravní technika a technologie**

Téma: **Posouzení energetiky provozu na traťovém úseku po jeho elektrifikaci**
Analysis of Energy Consumption on Railway Track Section after Its
Electrification

Jazyk vypracování: **čeština**

Zásady pro vypracování:

Cíl práce:

Na základě analýzy provozních podmínek stanovit normativy vybraných typů vlaků a jejich energetickou náročnost po předpokládané elektrifikaci na traťovém úseku Jeseník - Zábřeh na Moravě.

Postup řešení:

- 1) Analýza traťových a provozních poměrů na traťovém úseku a důsledků možné elektrifikace.
- 2) Stanovení normativů hmotností nákladních vlaků pro vybrané řady elektrických hnacích vozidel pro daný úsek.
- 3) Výpočet parametrů pohybu vybraných vlaků a jejich porovnání před a po elektrifikaci úseku.
- 4) Stanovení energetické náročnosti při dopravě těchto vlaků.
- 5) Provozně technické vyhodnocení.

Seznam doporučené odborné literatury:

Podklady provozovatelů dopravy

ŠIROKÝ, Jaromír. *Mechanika v dopravě*. Ostrava: VŠB-TU Ostrava, 2004.

ANTONICKÝ, Stanislav. *Provoz hnacích vozidel*. Bratislava: Alfa. 1987. 423 s.

ANTONICKÝ, Stanislav. *Provoz kolejových vozidel II (Vozební výpočty)*. Bratislava: Alfa. 1987.

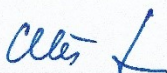
FMD. *Předpis V7 Trakční výpočty (včetně příloh)*. Praha. FMD. 1982.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

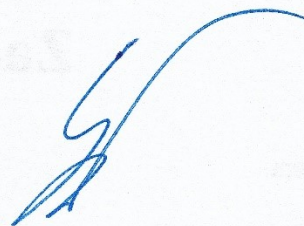
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jaromír Šíroký, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.
vedoucí katedry

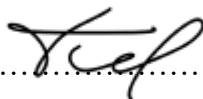


prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20. května 2019

..........

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen „autorský zákon“), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB – TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že – podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, že tato bakalářská práce před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce, a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 20. května 2019

.....
Podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu práce Ing. Jaromíru Širokému, Ph.D. za cenné rady a poskytnuté materiály během zpracovávání této bakalářské práce.

Anotace

Bakalářská práce se zabývá provozními podmínkami na traťovém úseku Jeseník – Zábřeh na Moravě. Po teoretické elektrifikaci stanovuje normativy hmotnosti pro závislou vozbu nákladního vlaku. Dále srovnává parametry pohybu a energetickou náročnost této vozby s vozbou nezávislou, která v současnosti na úseku funguje.

Annotation

This Bachelor's thesis deals with operational conditions on a railway section Jeseník – Zábřeh na Moravě. First, the theoretical electrification is described and weight specifications for freight trains dependent on energy supply are determined. Subsequently, parameters of movement and energy performance of these trains are compared to those of independently powered trains which are currently used on this railway section.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	10
Seznam tabulek, obrázků a grafů	13
Úvod	15
1. Teoretická část	16
1.1 Analýza traťových a provozních poměrů na traťovém úseku a důsledků možné elektrifikace	16
1.1.1 Traťový odpor	16
1.1.2 Vozidlový odpor	20
1.1.3 Odpor ze zrychlení	21
1.1.4 Teoretická elektrifikace trati	22
1.2 Normativy hmotnosti	22
1.2.1 Technický normativ hmotnosti – analytická metoda	22
1.2.2 Rozjezdový normativ hmotnosti	23
1.2.3 Průjezdový normativ hmotnosti	24
1.2.4 Náběhový technický normativ hmotnosti	24
1.3 Výpočet parametrů pohybu vlaku	26
1.3.1 Rovnice pohybu	27
1.3.2 Tachogram jízdy	27
1.3.3 Energetická náročnost	31
2. Praktická část	34
2.1 Analýza traťových poměrů na traťovém úseku Jeseník – Zábřeh na Moravě	34
2.1.1 Výpočet redukováného sklonu	34
2.1.2 Výpočet rozhodného stoupání a spádu	35
2.2 Výběr hnacích vozidel	38
2.2.1 Hnací vozidlo nezávislé vozby	38
2.2.2 Hnací vozidlo závislé vozby	39

2.3	Výpočet normativů hmotnosti pro hnací vozidlo E499.3	40
2.3.1	Technický normativ hmotnosti.....	41
2.3.2	Rozjezdový normativ hmotnosti.....	42
2.3.3	Průjezdový normativ hmotnosti	42
2.3.4	Náběhový technický normativ hmotnosti.....	43
2.3.5	Výsledný normativ hmotnosti	43
2.4	Výpočet parametrů pohybu vlaků.....	43
2.4.1	Tachogram jízdy pro hnací vozidlo řady 742.0	44
2.4.2	Energetická náročnost hnacího vozidla řady 742.0	48
2.4.3	Tachogram jízdy pro hnací vozidlo řady 163	49
2.4.4	Energetická náročnost hnacího vozidla řady 163	54
2.5	Provozně technické vyhodnocení	55
	Seznam použité literatury	57
	Přílohy	1
	Příloha č. 1: Tachogram jízdy hnacího vozidla řady 742.0 na porovnávacím úseku trati Jeseník – Zábřeh na Moravě	1
	Příloha č. 2: Tachogram jízdy hnacího vozidla řady 163 na porovnávacím úseku trati Jeseník – Zábřeh na Moravě	9

Seznam použitých značek a symbolů

Označení	Význam zkratky	Jednotka
E_C	Celková energie	[kW]
E_{NAP}	Spotřeba energie tažených vozidel	[kW]
E_{PZ}	Spotřeba energie pohonu pomocných zařízení	[kW]
E_{TR}	Spotřeba energie pro trakci	[kW]
E_Z	Spotřeba energie pro pokrytí ztrát	[kW]
F_O	Tažná síla na obvodu kol	[N]
F_Z	Tíha vozidla	[N]
F_{spR}	Tažná síla na spráhle	[N]
G_D	Tíha tažených vozidel	[N]
G_L	Tíha lokomotivy	[N]
G_N	Náběhová tíha	[N]
G_V	Tíha vlaku	[N]
I_{S1TM}	Střední proud jednoho trakčního motoru	[A]
M_N	Náběhový normativ hmotnosti	[t]
M_P	Průjezdový normativ hmotnosti	[t]
M_R	Rozjezdový normativ hmotnosti	[t]
M_T	Technický normativ hmotnosti	[t]
O_T	Odpor trati	[N]
O_V	Vozidlový odpor	[N]

O_f	Odpor valení kol	[N]
O_l	Odpor čepového tření	[N]
O_{pos}	Odpor ze zrychlení posuvných hmot	[N]
O_{rot}	Odpor ze zrychlení rotujících hmot	[N]
O_{rotyp}	Odpor ze zrychlení rotujících hmot vázaných převodem	[N]
O_s	Odpor sklonu	[N]
O_{vz}	Odpor prostření	[N]
O_z	Odpor ze zrychlení	[N]
Q_{tr}	Spotřeba pro trakci	[J]
R_O	Poloměr oblouku	[m]
T_{jT}	Teoretická jízdní doba	[min]
U_{1TM}	Napětí pro jeden trakční motor	[V]
U_N	Napětí v troleji	[V]
l'	Sklopená délka sklonového úseku	[m]
l_{obl}	Délka oblouku	[m]
l_{rk}	Délka redukovaného sklonu	[m]
l_{zb}	Zábrzdna délka	[m]
o_L	Součinitel vozidlového odporu lokomotivy	[1]
o_T	Součinitel odporu trati	[1]
o_V	Součinitel vozidlového odporu lokomotivy	[1]

o_z	Součinitel odporu ze zrychlení	[1]
q_0	Hodinová spotřeba paliva na volnoběhu	$[h^{-1}]$
q_i	Hodinová spotřeba paliva na stupních 1 až n	$[h^{-1}]$
s_{obl}	Sklon oblouku	$[\%o]$
s_r	Redukovaný sklon	$[\%o]$
s_{rk}	Rozhodné stoupání	$[\%o]$
s_{rz}	Rozhodný spád	$[\%o]$
t_{c0}	Celková doba jízdy při volnoběhu	[min]
t_{ci}	Celková doba jízdy na stupni 1 až n	[min]
B	Brzdná síla	[N]
V	Rychlost	$[km \cdot h^{-1}]$
a	Zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
g	Gravitační zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
l	Dílka úseku	[m]
p	Převýšení	[m]
s	Sklon	$[\%o]$
α	Úhel sklon	$[^\circ]$
κ	Poměrná spotřeba pomocných pohonů	[1]
φ	Měrná spotřeba pro napájení	$W \cdot N^{-1}$
ρ	Součinitel vlivu rotujících hmot	[1]

Seznam tabulek, obrázků a grafů

Tabulka 1.1: Velikost brzdného zpomalení, převato z Široký, 2004	30
Tabulka 2.1: Technické údaje lokomotivy řady 742.0	38
Tabulka 2.2: Technické údaje lokomotivy řady 163	39
Obrázek 1.1: Síly působící na vozidlo při jízdě	17
Obrázek 1.2: Podélné síly působící na vozidlo podle Širokého, 2004	26
Obrázek 1.3: I. popis kinematický, II. popis dynamický[1]	28
Obrázek 2.1: Ukázka tabulkového zpracování redukovaného sklonu	35
Obrázek 2.2: Ukázka tabulkového zpracování pro rozhodné stoupání	36
Obrázek 2.3: Ukázka tabelárního zpracování pro rozhodný spád	37
Obrázek 2.4: Lokomotiva řady 742.0 [10]	39
Obrázek 2.5: Lokomotiva řady 163 [12]	40
Obrázek 2.6: Trakční charakteristika řady 742.0 [13]	44
Obrázek 2.7: Zjištění tažené síly F_0 pro 10. krok	45
Obrázek 2.8: Ukázka tabelárního zpracování tachogramu hnacího vozidla T 466.2 na zadané trati	46
Obrázek 2.9: Trakční charakteristika vozidla řady 163	49
Obrázek 2.10: Zjištění tažné síly F_0 pro 2. krok	50
Obrázek 2.11: Ukázka tabelárního zpracování tachogramu hnacího vozidla E499.3 na zadané trati	52
Graf 2.1: Závislost rychlosti na ujeté vzdálenosti pro řadu 742.0	47
Graf 2.2: Závislost rychlosti na sklonu trati v čase pro řadu 742.0	48
Graf 2.3: Závislost rychlosti na ujeté vzdálenosti pro řadu 163	53

Graf 2.4: Závislost rychlosti na sklonu trati v čase pro řadu 163.....	54
Graf 2.5: Závislost rychlosti na ujeté vzdálenosti pro obě vozby	55
Graf 2.6: Závislost rychlosti na čase pro obě vozby	56

Úvod

Elektrifikace železničních tratí neboli elektrizace je nedílnou součástí modernizace železniční dopravy. Každá modernizace, v tomto případě elektrizace, nese s sebou značné množství výhod, ale i nevýhod. Poněvadž žijeme v moderní době, je velmi silným aspektem ekologie a s tím spojená elektrizace, která snižuje emisní dopad na životní prostředí a šetří neobnovitelné zdroje. Samotná železniční doprava produkuje minimum emisí, elektrická železnice potom neprodukuje žádné přímé emise.

Cílem práce je posoudit energetickou náročnost provozu aktuálního stavu (využívání naftových hnacích vozidel) a stavu po teoretické elektrizaci a určit normativy vlaků na traťovém úseku Jeseník – Zábřeh na Moravě.

První část práce je zaměřena na rozbor úseku a možných důsledků jeho elektrizace. Tento úsek je svým charakterem označován jako horská trať, neboť prochází chráněnou krajinnou oblastí Jeseníky. Trať je dále charakteristická svým značným převýšením a množstvím oblouků. Část trati je také známa pod označení Slezský Semmering, který odkazuje na náročný horský terén. Nicméně z dopravního hlediska je traťový úsek Jeseník – Zábřeh na Moravě složen ze dvou železničních tratí, a sice Zábřeh na Moravě – Šumperk, s označením č. 291, a železniční trať Šumperk – Krnov, s označením č. 292. Úsek slouží nejen pro osobní železniční přepravu, ale i pro nákladní železniční přepravu.

Z historického hlediska měla trať velký význam pro nákladní přepravu, neboť se na trati nacházelo značné množství výrobních podniků. V současnosti je i přes to, že bylo velké množství těchto podniků zrušeno, stále využívána pro nákladní přepravu. Proto druhá část práce stanovuje normativy hmotnosti nákladních vlaků pro vybrané řady elektrických hnacích vozidel.

Třetí část práce spočívá ve výpočtu parametrů pohybu vlaků za pomoci pohybové rovnice vlaku. Zkoumány jsou průběhy rychlosti vozidel, které znázorňuje tachogram, a dále jízdní doba. Výsledky těchto parametrů jsou porovnávány před a po elektrizaci.

Dalším počítaným parametrem je spotřeba energie při jízdě, a to jak pro elektrická hnací vozidla, tak pro hnací vozidla naftová. Je zde vyobrazené srovnání energetické náročnosti před a po elektrizaci tratě.

Poslední část se zabývá provozně technickým vyhodnocením celé práce. Poukazuje na výhody i nevýhody aktuálního stavu trati a případné elektrizace.

1. Teoretická část

Teoretická část práce slouží jako podklad pro část praktickou. Jsou zde uvedeny obecné postupy a vzorce pro řešení dané problematiky. Konkrétní řešení včetně výpočtů jsou uvedeny v praktické části.

1.1 Analýza traťových a provozních poměrů na traťovém úseku a důsledků možné elektrifikace

Analýza traťových a provozních poměrů představuje detailní rozbor trati, po níž jezdí vlaky. Při jízdě vlaku vznikají odpory, které představují síly způsobené jízdou vozidla. [1] Tyto odpory se dělí na aktivní a pasivní.

Aktivními odpory se rozumí odpory vzniklé mezi prvotním zdrojem pohybové energie (spalovací motor, trakční motor) a místem působení tažné síly (styk obvodu hnaného dvojkolí s kolejnicí). [2] Působí aktivně proti pohybu vozidla, nicméně jsou redukovatelné konstrukčním řešením vozidla.

Tato práce se zabývá odpory pasivními, které jsou závislé na vnějších silách, jež působí proti pohybu vozidla. Označují se jako jízdní odpory. [1] Podle místa jejich vzniku je dělíme na odpory traťové a vozidlové. [3]

1.1.1 Traťový odpor

Traťový odpor je složkou jízdního odporu. Tyto odporové síly vznikají působením tratě na pohybující se vozidlo. Působení odporových sil je proti pohybu vozidla a tyto síly jsou závislé na konstrukčním řešení trati (sklonové poměry, oblouky, tunely). Významný vliv na odpor má velikost stoupání včetně jeho délky. [5]

Všechny vzorce v práci jsou přejaty z publikace Mechanika v dopravě I – Kolejová vozidla (Jaromír Široký, 2004).

Obecně lze vyjádřit všechny odpory pomocí součinitele odporu, který je závislý na hmotnosti. Proto lze vyjádřit traťový odpor jako:

$$O_T = G_V \cdot o_T [N] \quad (1.1)$$

kde:

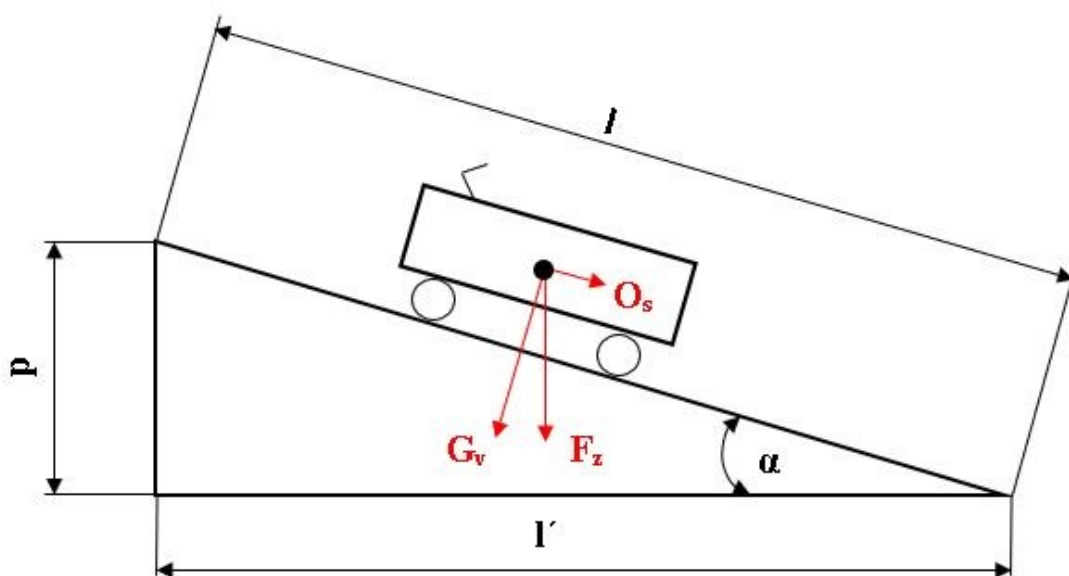
o_T [1] součinitel odporu trati,

G_V [N] tíha vozidla.

Odpor sklonu

Odpor sklonu způsobuje tíha vozidla, která se rozkládá na dvě složky. První složka je kolmá k rovině kolejnice a proti ní působí stejně velká síla opačného směru, kterou vyvolává. Tyto síly se vzájemně vyruší, tudíž nemají vliv na pohyb vozidla. Druhá složka je rozložena rovnoběžně ve směru pohybu vozidla a mohou pro ni nastat dva případy. V prvním případě je kladná a působí proti pohybu vozidla (jízda do stoupání). V tomto případě se projevuje jako odpor (na obrázku 1.1). V druhém případě je záporná a působí ve směru pohybu vozidla (jízda po spádu). Zde představuje zrychlující sílu pro vozidlo. [2]

Samotný sklon trati lze odvodit z pohybu tělesa po nakloněné rovině (na obrázku 1.1) jako přírůstek, respektive úbytek výšky nivelety na úseku dlouhém 1 000 m. [4]



Obrázek 1.1: Síly působící na vozidlo při jízdě

Vysvětlivky k obrázku:

O_s	[1]	odpor sklonu (vodorovná složka tíhy vozidla),
G_v	[N]	tíha vozidla (kolmá složka k rovině kolejnice),
F_z	[N]	tíha vozidla,
l	[m]	délka sklonového úseku,
l'	[m]	sklopená délka sklonového úseku,
p	[m]	převýšení trati,
s	[‰]	sklon trati,

α [°] úhel sklonu.

Z rozložení sil vozidla na sklonovém úseku zobrazeném na Obrázek 1.1: Síly působící na vozidlo při jízdě vyplývá vztah:

$$\frac{p}{l} = \tan \alpha = \frac{s}{1000} \quad (1.2)$$

Potom lze sklon trati vyjádřit jako:

$$s = \frac{p}{l} \cdot 10^3 = \tan \alpha \cdot 10^3 [\text{‰}] \quad (1.3)$$

kde:

$s > 0 \rightarrow$ jízda do stoupání

$s = 0 \rightarrow$ jízda po rovině

$s < 0 \rightarrow$ jízda po spádu

Přídavný odpor z oblouku

Přídavný odpor oblouku vzniká při jízdě vozidla obloukem, kde vlivem zakřivení koleje vznikají vnější síly, které jsou způsobeny třením nákolku a oběžné plochy kol s hlavou kolejnice. Vzniklá třecí síla se představuje jako zvýšený odpor – odpor z oblouku. Příčinami vzniku odporu oblouku mohou být: rozdílné délky kolejnic v oblouku, vliv pevného rozvoru dvojkolí, dostředivá složka tažné síly v oblouku, odstředivá síla v oblouku. [3] Přídavný odpor z oblouku není pouze traťovým odporem, nýbrž i odporem vozidlovým, jelikož závisí na konstrukčním řešení vozidla, jeho technickém stavu a na rychlosti, kterou je oblouk projížděn. [2]

Odpor z oblouku je substituován vlivem přídavného sklonu, který je vyjádřen empiricky:

$$s_{obl} = \frac{600}{R_o} [\text{‰}] \quad (1.4)$$

kde:

R_o [m] poloměr oblouku.

Vzorec je platný pro konvenční tratě s rychlostí do $200 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a normálním rozchodem 1 435 mm. V případě na sebe navazujících protisměrných oblouků se vypočtená hodnota násobí koeficientem 1,5.

Odpor tunelu

Dalším traťovým odporem je odpor tunelu, který vzniká při průjezdu vozidla úzkým otvorem, jenž zvětšuje aerodynamický odpor. Vozidlo během jízdy v tunelu vytlačuje sloupec vzduchu, který nemá dostatečný prostor pro rozplynutí, tudíž v tunelu způsobuje víření kolem vlaku. [4]

Na zadaném traťovém úseku se nenachází ani jeden tunel, tudíž se práce nebude tímto odporem dále zabývat.

Redukovaný sklon

Pro usnadnění dimenzování trati je zaveden tzv. redukovaný sklon, který obsahuje všechny tři složky – odpor sklonu, přídatný odpor z oblouku a odpor tunelu. Redukovaný sklon odpovídá velikosti součinitele odporu trati: [1]

$$s_r = o_T \quad (1.5)$$

Jelikož se na trati nenachází žádný tunel, je složka odpor tunelu ve vzorci vynechána. Redukovaný sklon můžeme vyjádřit jako:

$$s_r = \frac{s \cdot l + \sum_k s_{obl_k} \cdot l_{obl_k}}{l} [\text{‰}] \quad (1.6)$$

kde:

s_r	[‰]	redukovaný sklon,
s	[‰]	sklon úseku trati,
s_{obl_k}	[‰]	sklon k-tého oblouku na daném úseku trati,
l	[m]	délka sklonového úseku,
l_{obl_k}	[m]	délka k-tého oblouku.

Sklonové parametry tratě

Jedná se o charakteristiky, které jsou významné při stanovování hmotnosti rychlostí vlaku. Tyto charakteristiky ovlivňují výběr vozidel pro danou trať. [1]

- **rozhodné stoupání s_{rk}** – *největší redukované stoupání na úseku stanovené délky na sledované části trati* (Široký, 2004, s. 38)

$$s_{rk} = \frac{\sum_k s_{rk} \cdot l_k}{l_{rk}} [\text{‰}] \quad (1.7)$$

kde:

s_{rk}	[‰]	k-tý redukovaný sklon,
l_k	[m]	délka redukovaného sklonového úseku,
l_{rk}	[m]	redukovaná délka (1 000 m).

• **rozhodný spád s_{rz}** – největší průměrný spád úseku stanovené délky na sledovaném úseku tratě, přičemž se neuvažuje odpor oblouků a tunelů. (Šíroký, 2004, s. 38)

$$s_{rz} = \frac{\sum_k s_i \cdot l_k}{l_{zb}} [\text{‰}] \quad (1.8)$$

kde:

s_i	[‰]	i-tý sklonový úsek trati,
l_k	[m]	délka i-tého sklonového úseku,
l_{zb}	[m]	zábrzdna vzdálenost (400, 700, 1 000 m).

1.1.2 Vozidlový odpor

Vozidlový odpor je složka jízdního odporu, která je závislá zejména na konstrukci a stavu vozidla a jeho rychlosti, jíž se pohybuje. Vozidlový odpor vzniká třením kol s kolejnicí a stykem vozidla s vnějším prostředím. [4] Má tři hlavní složky: odpor valení kola po kolejnici, odpor čepového tření v ložiscích a odpor prostředí. [1] Přídavnými složkami odporu mohou být odpor pohnutí z místa, vliv teploty okolí a odpor hnacích vozidel při jízdě výběhem. [4] Díky poslední přídavné složce můžeme vozidlový odpor dále rozdělit na odpor hnacích vozidel a odpor tažených vozidel.

Obecně tedy lze odpor vyjádřit jako součet hlavních složek:

$$O_V = G_V \cdot o_v = O_f + O_l + O_{vz} [N] \quad (1.9)$$

kde:

O_f	[N]	odpor valení kola po kolejnici,
O_l	[N]	odpor čepového tření v ložiscích,
O_{vz}	[N]	odpor prostředí.

Vozidlový odpor se zjednodušeně určuje pomocí polynomu druhého stupně, a nikoliv pomocí konkrétních hodnot jednotlivých složek, poněvadž odpor valení kola po kolejnici a odpor čepového tření jsou nestálé a velmi proměnlivé. Složkou mající největší vliv je rychlost vozidla. Vozidlový odpor je tedy vyjádřen empiricky pomocí koeficientů součinitele vozidlového odporu závislých na okamžité rychlosti vozidla: [1]

$$o_v = a + b \cdot V + c \cdot V^2 \quad [1] \quad (1.10)$$

kde:

V	[km · h ⁻¹]	okamžitá rychlost,
a	[1]	koeficient smykového tření v ložiskách vozidla,
b	[1]	koeficient valivého tření kola po kolejnici,
c	[1]	koeficient tření o vzduch.

1.1.3 Odpor ze zrychlení

Odpor ze zrychlení reprezentuje síly působící při změně rychlosti. Tyto síly účinkují proti směru pohybu vozidla. Tento odpor obsahuje tři složky: odpor ze zrychlení posuvných hmot, odpor rotujících hmot a odpor rotujících hmot vázaných převodem.

Obecně jej lze vyjádřit jako:

$$O_z = G_V \cdot o_z = O_{pos} + O_{rot} + O_{rotp} \quad [N] \quad (1.11)$$

kde:

o_z	[1]	měrný odpor ze zrychlení,
O_{pos}	[N]	odpor ze zrychlení posuvných hmot,
O_{rot}	[N]	odpor ze zrychlení rotujících hmot,
O_{rotp}	[N]	odpor ze zrychlení rotujících hmot vázaných převodem.

Při zavedení součinitele rotujících hmot ρ pak pro odpor ze zrychlení můžeme psát:

$$O_z = G_V \cdot \frac{a}{g} \cdot (1 + \rho) [N] \quad (1.12)$$

kde:

a	$[m \cdot s^{-2}]$	zrychlení vozidla,
g	$[m \cdot s^{-2}]$	tíhové zrychlení,
ρ	[1]	součinitel vlivu rotujících hmotnosti.

Pro zjednodušení při výpočtech uvažujeme velikost součinitele vlivu rotujících hmot $\rho = 0,06$.

1.1.4 Teoretická elektrifikace trati

Pro teoretickou elektrifikaci tratě předpokládáme stejnosměrnou proudovou soustavu s napětím v troleji 3 000 V, která je již zavedena na trati ze Zábřehu na Moravě přes Bludov do Šumperku. U této proudové soustavy je proud přiváděn jednoduchým vodičem. [6]

1.2 Normativy hmotnosti

Zde bude popsána základní skupina normativů. Je nutno rozlišit dopravní hmotnost a hmotnost vozidla. Dopravní hmotnost představuje celkovou hmotnost všech vozidel zařazených ve vlaku, kdežto hmotnost vozidla představuje hmotnost jednoho prázdného vozidla včetně jeho nákladu, hmotnosti cestujících včetně personálu a provozních hmot. [1] Normativy hmotnosti vyjma náběhového technického normativu hmotnosti vycházejí ze základní pohybové rovnice vlaku.

1.2.1 Technický normativ hmotnosti – analytická metoda

Tento normativ představuje dopravní hmotnost vybraného hnacího vozidla, pro které byl stanoven vozidlový odpor a pravidelná jízdní doba. Značí se M_t a udává se v tunách nebo newtonech. [1]

Výpočet vychází ze základní rovnice pohybu vlaku pro tíhu hnacího vozidla:

$$F_O - G_L \cdot o_L - G_D \cdot o_D - (G_L + G_D) \cdot o_T = \frac{1}{g} \cdot (1 + \rho) \cdot (G_L + G_D) \cdot \frac{dv}{dt} \quad (1.13)$$

kde:

F_O	[N]	tažná síla na obvodu kol,
-------	-----	---------------------------

G_L	[N]	tíha hnacího vozidla,
o_L	[1]	součinitel vozidlového odporu hnacího vozidla,
G_D	[N]	tíha tažených vozidel,
o_L	[1]	součinitel vozidlového odporu tažených vozidel.

Z rovnice je třeba vyjádřit tíhu dopravovaných vozidel G_D

$$F_O - G_L \cdot o_L - G_D \cdot o_D - (G_L + G_D) \cdot o_T = \frac{1}{g} \cdot (1 + \rho) \cdot G_L \cdot \frac{dv}{dt} + \frac{1}{g} \cdot (1 + \rho) \cdot G_D \cdot \frac{dv}{dt}$$

$$F_O - G_L \cdot o_L - \frac{1}{g} \cdot (1 + \rho) \cdot G_L \cdot \frac{dv}{dt} - G_L \cdot o_T = \frac{1}{g} \cdot (1 + \rho) \cdot G_D \cdot \frac{dv}{dt} + G_D \cdot o_D + G_D \cdot o_T$$

$$G_D = \frac{F_O - G_L \cdot o_L - \frac{1}{g} \cdot (1 + \rho) \cdot G_L \cdot \frac{dv}{dt} - G_L \cdot o_T}{\frac{1}{g} \cdot (1 + \rho) \cdot \frac{dv}{dt} + o_D + o_T} [N] \quad (1.14)$$

U technického normativu je předpoklad, že rychlost V je konstantní; pak bude mít rovnice (1.14) tvar:

$$G_D = \frac{F_O - G_L \cdot o_L - G_L \cdot o_T}{o_D + o_T} [N] \quad (1.15)$$

Technický normativ M_t se následně stanoví jako:

$$M_T = M_D = \frac{G_D}{g} \cdot 10^{-3} [t]$$

$$M_T = \frac{F_O - G_L \cdot o_L - G_L \cdot o_T}{g \cdot (o_D + o_T)} \cdot 10^{-3} [N] \quad (1.16)$$

1.2.2 Rozjezdový normativ hmotnosti

Jedná se o normativ dopravní hmotnosti určené řady hnacích vozidel, který je důležitý při rozjezdu vlaku v konkrétním úseku trati nebo místě. Značí se $\mathbf{M_R}$ a je vyjádřen v tunách. [1]

Výpočet vychází z upravené základní rovnice pohybu vlaku pro určení normativu hmotnosti:

$$F_{spR} - G_D \cdot o_D - G_L \cdot o_T - G_D \cdot o_T = 0 \quad (1.17)$$

kde:

F_{spR}	[N]	tažná síla na spřáhle pro rozjezd
-----------	-----	-----------------------------------

Odvozením získáme rozjezdovou hmotnost:

$$M_R = \frac{F_{spR} - G_L \cdot o_T}{o_D + o_T + o_R} \cdot \frac{10^{-3}}{g} [t] \quad (1.18)$$

kde:

o_R [1] součinitel rozjezdového odporu

1.2.3 Průjezdový normativ hmotnosti

Tento normativ představuje dopravní hmotnost konkrétní skupiny hnacích vozidel určených pro průjezd určitým úsekem či místem bez zastavení či zpomalení. Stanovuje se pro průjezdovou rychlost. Značí se M_P a je vyjádřen v tunách. [1]

Opět se stanovuje z pohybové rovnice vlaku:

$$M_P = \frac{F_{spP} - G_L \cdot o_T}{o_D + o_T} \cdot \frac{10^{-3}}{g} [t] \quad (1.19)$$

Rychlost V_p pro určení tažné síly na spráhle pro průjezd je větší než stálá rychlost při zařazeném nejvyšším výkonovém stupni. Avšak minimální hodnota pro hlavní tratě je $V_p = 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a pro vedlejší tratě $V_p = 15 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ [1]

1.2.4 Náběhový technický normativ hmotnosti

Tímto normativem se rozumí dovolená dopravní hmotnost vlaku jedoucího do příkrého a krátkého stoupání, přičemž využívá vlastní kinetickou energii. Jedná se tedy o jízdu výběhem, která musí splňovat podmínku a to sice, že rychlost vlaku nesmí klesnout pod $20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. U vozidel závislé trakce by rychlost neměla klesnout pod rychlost, která odpovídá hodinovému proudu při jízdě na hospodárném stupni. Značí se M_N a je vyjádřen v tunách. [1]

Výpočet normativu vychází z kinetické energie vlaku při jízdě:

$$E_P = \frac{1}{2} m \cdot (1 + \rho) \cdot v^2 [J]$$

kde:

E_P [J] kinetická energie vlaku

Vzorec je třeba upravit pro rychlost vozidel v $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$

$$E_P = \frac{1}{2} m \cdot (1 + \rho) \cdot \frac{V^2}{3,6} [J]$$

Zúročení kinetické energie lze vyjádřit jako:

$$F_P = \frac{1}{2 \cdot 3,6^2} \cdot (1 + \rho) \cdot \frac{G}{g} \cdot (V_2^2 - V_1^2) \cdot \frac{1}{l_n} [N] \quad (1.20)$$

kde:

- l_n [m] délka náběhového úseku,
 V_1 [km·h⁻¹] očekávaná rychlost na konci příkrého úseku,
 V_2 [km·h⁻¹] rychlost na počátku příkrého úseku.

V případě zahrnutí této síly do rovnicemi získáme tento vzorec:

$$F_{spP} - G_N \cdot \overline{o_D} - (G_L + G_N) \cdot o_T - \frac{1}{2 \cdot 3,6^2} \cdot (1 + \rho) \cdot \frac{G_L - G_N}{g} \cdot (V_2^2 - V_1^2) \cdot \frac{1}{l_n} = 0$$

kde:

- F_{spN} [N] střední hodnota tažné síly na spřáhle,
 $\overline{o_D}$ [1] střední hodnota součinitele vozidlového odporu,
 G_N [N] náběhová tíha.

Po dosazení obecného vztahu pro výpočet tíhy dostaneme:

$$F_{spP} - 10^3 \cdot M_N \cdot g \cdot \overline{o_D} - (G_L + 10^3 \cdot M_N \cdot g) \cdot o_T - \frac{1}{2 \cdot 3,6^2} \cdot (1 + \rho) \cdot \frac{G_L - 10^3 \cdot M_N \cdot g}{g} \cdot (V_2^2 - V_1^2) \cdot \frac{1}{l_n} = 0$$

Z tohoto vzorce vyjádříme náběhový normativ. Můžeme tedy psát:

$$M_N = \frac{10^{-3}}{g} \cdot \frac{F_{spN} - G_L \cdot \left(o_T - \frac{1 + \rho}{g} \cdot \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot 3,6^2} \cdot \frac{1}{l_n} \right)}{\overline{o_D} + o_T + \frac{1 + \rho}{g} \cdot \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot 3,6^2} \cdot \frac{1}{l_n}} [t] \quad (1.21)$$

Pro využití v praxi se normativ stanovuje jako minimální hodnota ze všech předchozích normativů čili $M = \min(M_t, M_R, M_P, M_N)$. Dále se stanovuje dle zátěžových tabulek, které jsou sestaveny pro konkrétní řady hnacích vozidel. Tabulka vyjadřuje vztah mezi normativy hmotnosti v hmotnostním vyjádření a rychlostí a sklonem, který se vyjadřuje jako třída sklonu, pro kterou platí vztah: $třída\ sklonu = \frac{s+2}{2} \cdot [1]$

1.3 Výpočet parametrů pohybu vlaku

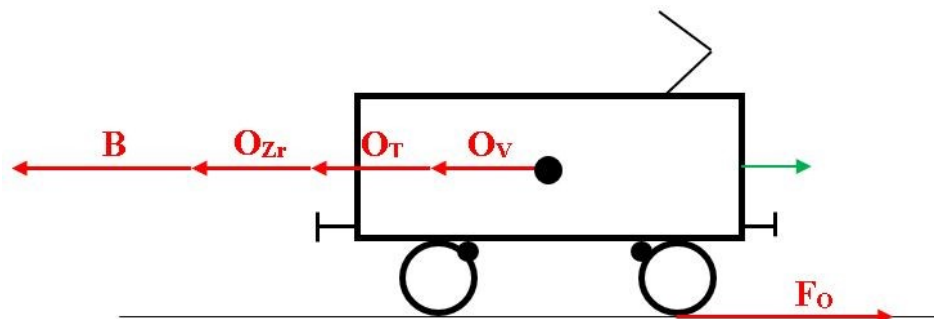
Pro výpočet parametrů pohybu vlaku se na pohyb vlaku nahlíží jako na ideální. Za ideální pohyb se považuje pohyb hmotného bodu s jedním stupněm volnosti, který se pohybuje přímočaře po trajektorii tvořené dokonalou dopravní cestou a za ideálního valení (nedochází ke skluzu). Na hmotný bod působí vnější kolineární síly ve směru jeho pohybu a uvažuje se zde tíha hmotného bodu. Tyto síly jsou považovány za statické, tzn. že změna pohybu je podmíněna okamžitou změnou těchto sil. [1]

U trakčních výpočtů je hmotný bod nahrazen pojmem ideální vozidlo, které představuje tuhé, homogenní těleso. Působíště sil je uloženo v jeho těžišti případně na styku kola a kolejnice.

Kolineární síly působící na vozidlo v jeho směru se dělí do tří skupin: [4]

- a) Síly tažné – síly vyvolané hnacím zařízením, které působí ve směru jízdy
- b) Síly odporové – odpory působící nesouhlasně se směrem pohybu vozidla
- c) Síly brzdné – síly působící nesouhlasně se směrem pohybu vozidla

Kolineární síly působící na vozidlo jsou zobrazeny níže. (Obrázek je přejat z Široký, 2004, s. 29):



Obrázek 1.2: Podélné síly působící na vozidlo podle Širokého, 2004

Vysvětlivky k obrázku:

B	[N]	brzdná síla,
O_{Zr}	[N]	odpor ze zrychlení,
O_T	[N]	traťový odpor,
O_V	[N]	vozidlový odpor,
F_O	[N]	tažná síla.

Z obrázku je patrná rovnováha sil:

$$F_t - O_V - O_T - O_Z - B = 0 [N] \quad (1.22)$$

Jelikož uvažujeme pohyb, tak brzdná síla je považována za nulovou, proto můžeme psát:

$$F_t - O_V - O_T - O_Z = 0 [N] \quad (1.23)$$

Hlavními parametry, které popisují pohyb vlaku po dopravní cestě jsou rychlost, dráha a čas. Z praktických důvodů je výhodnější popsat pohyb vlaku pomocí závislosti rychlosti na čase nebo na dráze. [4] Tuto závislost popisuje tachogram, kterému je věnována samotná podkapitola 1.3.2. Dalším parametrem je energetická náročnost. Pro vztahy využití v tachogramu je nutná znalost pohybové rovnice vlaku.

1.3.1 Rovnice pohybu

Rovnice vychází z druhého Newtonova zákona a je nástrojem pro výpočet normativů hmotnosti vlaku, proto zde figuruje její zkrácené odvození. Z rovnice (1.23) můžeme vozidlový odpor, který představuje odpor celého vlaku rozepsat na součet vozidlového odporu hnacího vodila O_L a vozidlového odporu vozidel tažených O_D :

$$F_O - O_L - O_D - O_T - O_Z = 0 [N] \quad (1.24)$$

Nyní můžeme jednotlivé odpory nahradit součinem daného součinitele odporu a jeho tíhy:

$$F_O - G_L \cdot o_L - G_D \cdot o_D - (G_L + G_D) \cdot o_T - (G_L + G_D) \cdot o_{zr} = 0 [N]$$

Po upravení rovnice a diferenciálním vyjádření součinitele odporu ze zrychlení dostaneme základní pohybovou rovnici pro kolejová vozidla:

$$F_O - G_L \cdot o_L - G_D \cdot o_D - (G_L + G_D) \cdot o_T = \frac{1}{g} \cdot (1 + \rho) \cdot (G_L + G_D) \cdot \frac{dv}{dt} [N] \quad (1.25)$$

1.3.2 Tachogram jízdy

Tachogram jízdy reprezentuje zobrazení závislosti rychlosti vozidel na nezávislém parametru. Nezávislým parametrem může být ujetá dráha, případně čas. Potom se jedná o dráhový tachogram – $V = f(L)$, respektive časový tachogram – $V = f(T)$. Tachogram lze zpracovat graficky či numericky. Mezi grafické metody patří například Müllerova metoda, Loudova metoda, MPS metoda a další. Numerické metody se dělí na základě vybraného parametru výpočtu, kterým může být buď rychlostní krok Δv , nebo časový krok Δt . Dále se budeme zabývat pouze metodou s časovým krokem, která je vhodná zejména při použití

automatizovaných výpočtů. Ještě před samotnou metodou je potřeba popsat pohyb vlaku mezi dvěma místy zastavení. Tento popis může být: [1]

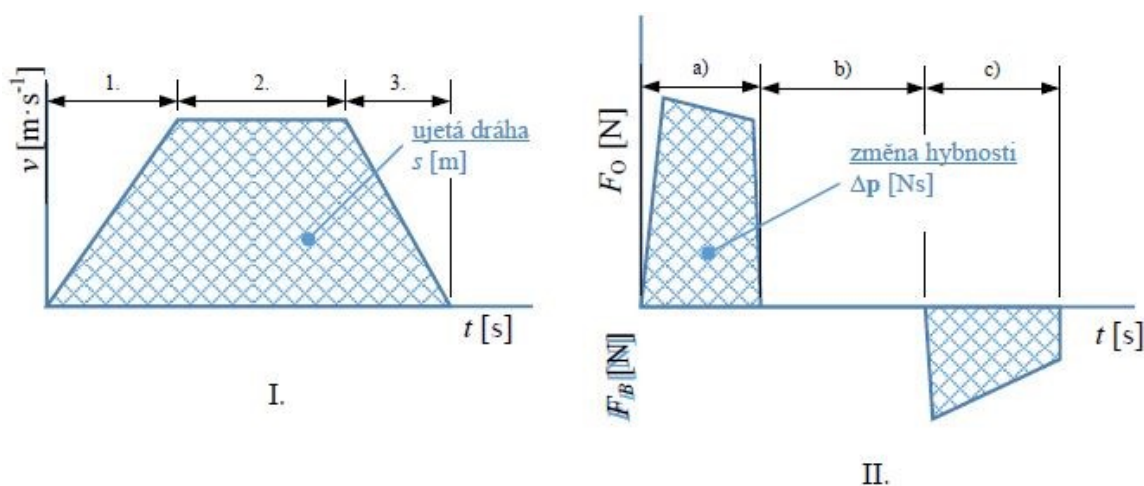
I. Kinematický:

1. Zrychlování – rychlost jízdy se zvyšuje $v_1 < v_2$ a $a > 0$;
2. Jízda konstantní rychlostí – rychlost jízdy se nemění $v_1 = v_2$ a $a = 0$;
3. Zpomalování – rychlost se zmenšuje $v_1 > v_2$ a $a < 0$;

II. Dynamický:

- a) Jízda silou – pro tažnou sílu na obvodu kol platí: $F_O > 0$ a $F_B = 0$;
- b) Výběh – nepůsobí tažná ani brzdná síla $F_O = 0$ a $F_B = 0$;
- c) Brždění – působí brzdná síla $F_O = 0$ a $F_B > 0$.

Tyto popisy jsou graficky znázorněny na obrázku 1.3: [1]



Obrázek 1.3: I. popis kinematický, II. popis dynamický [1]

Metoda s časovým krokem Δt

Metoda s časovým krokem má dva způsoby řešení. Prvním způsobem je řešení s konstantní hodnotou tažné síly na regulačním stupni. Druhým způsobem je řešení s lineární změnou tažné síly a vozidlového odporu. Práce se zabývá pouze prvním způsobem, tedy metodou s konstantní hodnotou tažné síly na regulačním stupni. Tato metoda je vhodná k použití u hnacích vozidel, které mají plynulou regulaci výkonu (tažné síly). To znamená, že je u těchto vozidel možné plynule regulovat tažnou sílu na obvodu kol. Abychom mohli tažnou sílu považovat za konstantní je nutno volit velmi malé časové kroky $\Delta t_i \in \langle 1; 10 \rangle$. To samé platí pro součinitele vozidlových odporů. Tyto hodnoty se stanovují pro rychlost, která je na počátku výpočtového kroku. Dle velikosti tažné síly mohou nastat tyto čtyři případy:

1) jízda silou – tažná síla na obvodu kol je kladná

Pro přírůstek rychlosti platí:

$$\Delta v_i = \frac{g}{(1 + \rho)} \cdot \frac{F_O - G_L \cdot o_L - G_D \cdot o_D - (G_L + G_D) \cdot o_T}{G_L + G_D} \cdot \Delta t_i [m \cdot s^{-1}] \quad (1.26)$$

Rychlost na konci daného výpočtového kroku bude:

$$v_i = v_{i-1} + \Delta v_i [m \cdot s^{-1}] \quad (1.27)$$

Přírůstek dráhy v daném výpočtovém kroku je podmíněn lineárním nárůstem rychlosti s časem:

$$\Delta l_i = v_{si} \cdot \Delta t_i [m] \quad (1.28)$$

kde

$$v_{si} = \frac{v_i + v_{i-1}}{2} [m \cdot s^{-1}]$$

Na konci výpočtového kroku bude poloha vlaku:

$$l_i = l_{i-1} + \Delta l_i [m] \quad (1.29)$$

2) jízda výběhem – nulová tažná síla na obvodu kol

Výpočet je podobný předchozímu s tím rozdílem, že tažná síla na obvodu kol je nulová. Zbytek výpočtu je stejný.

Pro přírůstek rychlosti můžeme tedy psát:

$$\Delta v_i = -\frac{g}{(1 + \rho)} \cdot \frac{G_L \cdot o_L - G_D \cdot o_D - (G_L + G_D) \cdot o_T}{G_L + G_D} \cdot \Delta t_i [m \cdot s^{-1}] \quad (1.30)$$

3) jízda konstantní rychlostí

Jízda konstantní rychlostí má za následek nulový přírůstek rychlosti, čehož můžeme dosáhnout např. rovnováhou podélných sil či režimem brždění pro dodržování konstantní rychlosti. Pro všechny případy se předpokládá redukovaný sklon trati.

Dráha takové jízdy se spočte:

$$\Delta l_i = (L_{uk} - L_{i-1}) \cdot 10^{-3} [m] \quad (1.31)$$

kde:

L_{uk} [km] nejbližší následující poloha změny redukovaného sklonu pro daný směr jízdy

Doba jízdy pro tyto podmínky je:

$$\Delta t_i = \frac{\Delta l_i}{v_i} [s] \quad (1.32)$$

4) brždění vlaku – tažná síla na obvodu kol je záporná

Pro tento způsob jízdy se zavádí následující zjednodušení:

- a) brzdné zpomalení je po dobu brždění konstantní a jeho hodnota je zobrazena v následující tabulce:

Tabulka 1.1: Velikost brzdného zpomalení, přejato z Šíroky, 2004

Typ vlaku	Režim brždění	$a_b (m \cdot s^{-1})$
Osobní vlaky	Nouzové brždění (rychločinné)	-1,0
	Provozní brždění	$\langle -0,8; -0,4 \rangle$
Nákladní vlaky	Provozní brždění	$\langle -0,5; -0,2 \rangle$

- b) neuvažuje se čas reakce obsluhy a čas přípravy brzdové soustavy
c) brzdová soustava vlaku má dostatečný výkon

Po zavedení zjednodušení můžeme pro dobu brždění psát:

$$t_b = \frac{v_p - v_k}{|a_b|} [s] \quad (1.33)$$

kde:

v_p [m · s⁻¹] počáteční rychlost brždění,

v_k [m · s⁻¹] konečná požadovaná rychlost brždění.

Dráha určená ke snížení rychlosti:

$$\Delta l_b = \frac{1}{2} \cdot \frac{v_k^2 - v_p^2}{a_b} [m] \quad (1.34)$$

Vlak se po konci brždění bude nacházet:

$$L_i = L_{i+1} + \Delta l_b \cdot 10^3 [km] \quad (1.35)$$

Určení teoretické jízdní doby

Teoretická jízdní doba reprezentuje součet sum přes všechny výpočtové kroky časových intervalů:

$$t_{jT} = \sum_i \Delta t_i + \sum_b t_b \text{ [s]} \quad (1.36)$$

V praxi je používána teoretická jízdní doba v minutách:

$$T_{jT} = \frac{t_{jT}}{60} [\text{min}] \quad (1.37)$$

1.3.3 Energetická náročnost

Tato část práce se zabývá spotřebou energie naftových vozidel, která jezdí po dané trati, a spotřebou vozidel elektrické trakce, která budou pro účely práce vybrána na základě parametrů trati. Spotřebu energie můžeme určovat dvěma způsoby, a to přímou integrací příkonu nebo z výpočtu trakční práce a ztrátových složek. [3] Práce se soustředí na druhou metodu, která vychází z tachogramu jízdy vlaku.

Spotřeba motorové nafty

V tomto případě se určuje spotřeba nafty pouze na vlastní trakční práci hnacího vozidla a na pokrytí spotřeby dalších pomocných pohonů. [8] (Výpočty převzaty z normy ČSD V7 Trakční výpočty, 1982)

Pro výpočet spotřeby nafty můžeme tedy psát:

$$Q_{tr} = \frac{1}{60} \cdot \sum_{i=1}^n (q_i \cdot t_{ci}) + q_0 \cdot t_{c0} \text{ [J]} \quad (1.38)$$

kde:

Q_{tr}	[J]	spotřeba pro trakci,
q_i	[h ⁻¹]	hodinová spotřeba paliva na stupních 1 až n,
q_0	[h ⁻¹]	hodinová spotřeba paliva na volnoběhu,
t_{ci}	[min]	celková doba použití stupně 1 až n,
t_{c0}	[min]	celková doba jízdy při volnoběhu spalovacího motoru.

Celková spotřeba nafty pro dieselové lokomotivy s elektrickým vytápěním bude:

$$Q_C = \frac{1}{60} \cdot \sum_{i=1}^n (q_i \cdot t_{ci}) + q_0 \cdot t_{c0} + q_0 \cdot t_{pob} [J] \quad (1.39)$$

kde:

t_{pob} [min] celková doba nácestných pobytů.

Spotřeba elektrické energie

Spotřeba elektrické energie včetně tachogramu vychází z úplné trakční charakteristiky. Pro celkovou energii vozidel závislé vozby určené na sběrači hnacího vozidla můžeme psát: [1]

$$E_C = E_{TR} + E_{PZ} + E_{NAP} + E_Z [kW \cdot h] \quad (1.40)$$

kde:

E_{TR} [kW] spotřeba energie pro trakci,

E_{PZ} [kW] spotřeba energie pohonu pomocných zařízení,

E_{NAP} [kW] spotřeba energie tažených vozidel,

E_Z [kW] spotřeba energie pro pokrytí ztrát.

Pro výpočet jednotlivých složek je potřeba znát napětí, které je dodáváno jednomu trakčnímu motoru, a spotřebu energie jednoho trakčního motoru:

Pro napětí dodávané jednomu trakčnímu motoru můžeme psát:

$$U_{1TM} = \frac{U_N}{p} [V] \quad (1.41)$$

kde:

U_{1TM} [V] dodávané napětí jednomu trakčnímu motoru,

U_N [V] napájecí napětí,

p [1] množství trakčních motorů, které jsou zapojeny sériově.

Výpočet spotřeby energie jednoho trakčního motoru se spočte jako suma v i-tém časovém kroku:

$$E_{1TM} = \sum_i U_{TM_i} \cdot I_{S1TM_i} \cdot \Delta t_i [W \cdot s] \quad (1.42)$$

kde:

I_{S1TM} [A] průměrná hodnota proudu,

Δt [s] doba trvání časového kroku.

Následně můžeme psát pro spotřebu trakční energie:

$$E_{TR} = E_{1TM} \cdot n_{TM} [kW \cdot h] \quad (1.43)$$

kde:

n_{TM} [1] počet trakčních motorů na hnacím vozidle.

Energetická spotřeba pomocných zařízení se spočte:

$$E_{PZ} = \kappa \cdot E_{1TM} [kW \cdot h] \quad (1.44)$$

kde:

κ [1] poměrná spotřeba pomocných pohonů,

$\kappa = 0,02$ pro stejnosměrnou trakci,

$\kappa = (0,025; 0,03)$ pro střídavou trakci.

Energetická spotřeba pro napájení tažených vozidel:

$$E_{NAP} = k_{kW} \cdot \varphi \cdot G_D \cdot t_{NAP} [kW \cdot h] \quad (1.45)$$

kde:

k_{kW} [1] koeficient pro převod jednotek $k_{kW} = 6 \cdot 10^{-2}$,

φ [$W \cdot N^{-1}$] měrná spotřeba pro napájení $\varphi \in (1; 7,5)$,

G_D [N] tíha tažených vozidel,

t_{NAP} [s] doba napájení pomocných zařízení tažených vozidel.

Poslední složkou je spotřeba energie pro pokrytí ztrát, která se považuje pro tento výpočet za nulovou, protože všechny ztráty obsahují předcházející složky. [1]

2. Praktická část

V této části budou rozebrány konkrétní výpočty, které povedou k výběru vozidla elektrické trakce. Nejdříve bude dle parametrů trati vybráno vhodné vozidlo pro danou trať s ohledem na provozní činnost, jíž je nákladní doprava. Následně budou stanoveny jeho hmotnostní normativy. Dalším krokem bude výpočet parametrů pohybu vlaku (tachogram) pro vybrané vozidlo elektrické trakce a pro vozidlo nezávislé trakce, které je v současnosti na trati používáno. Na základě jejich tachogramů bude určena energetická náročnost. Posledním krokem bude provozně technické vyhodnocení.

2.1 Analýza traťových poměrů na traťovém úseku Jeseník – Zábřeh na Moravě

Analýza trati spočívá v určení traťového odporu, který je substituován redukováným sklonem trati. Dalšími výpočty se rozumí především rozhodné stoupání a rozhodný spád, které jsou důležité při výběru hnacího vozidla.

Trať ve směru Jeseník – Zábřeh na Moravě je rozdělená na celkem 290 sklonových úseků o celkové délce 65,237 km. Je zde 190 oblouků, z toho 86 levých a 104 pravých. Největší stoupání činí 27,28 ‰ a největší spád 32,89 ‰.

2.1.1 Výpočet redukováného sklonu

Pro výpočet redukováného sklonu je nutné znát délku a velikost sklonu jednotlivých sklonových úseků trati, včetně přídatného sklonu z oblouků. Velikost sklonu, délka úseků a délka oblouků včetně jejich poloměru a orientace byla přečtena z výkresové dokumentace SŽDC (Správa železniční dopravní cesty), jež se nachází v přílohách.

Příklad výpočtu přídatného sklonu z oblouku dle vztahu (1.4) na úseku č. 17 oblouku č. 13 mezi Lipová Lázně – zastávka a Lipová Lázně:

$$s_{obl_{17}} = \frac{600}{R_o} = \frac{600}{400} = 1,5 \text{ ‰}$$

Potom dle vztahu (1.6) pro **redukováný sklon na úseku č. 17** můžeme psát:

$$s_{r_{17}} = \frac{s \cdot l + \sum_k s_{obl_k} \cdot l_{obl_k}}{l} = \frac{20,44 \cdot 144 + 1,5 \cdot 110,07}{144} = 21,59 \text{ ‰}$$

Výpočty pro všechny sklonové úseky jsou zpracovány tabulkově v programu Excel, které se nachází na přiloženém DVD.

Ukázka tabulkového zpracování parametrů trati je zobrazena na obrázku níže.

i	k	s _i [‰]	l _i [m]	R1 [‰]	l1 obl k [m]	R2 [‰]	l2 obl k [m]	R3 [‰]	l3 obl k [m]	s1 obl k [‰]	s2 obl k [‰]	s3 obl k [‰]	R1 [‰]	l1 obl k [m]	R2 [‰]	l2 obl k [m]	R3 [‰]	l3 obl k [m]	s1 obl k [‰]	s2 obl k [‰]	s3 obl k [‰]	s _r [‰]
166	110,111	-18,26	305	191	131,795					3,141			500	35,005					1,200			-16,7648
167	111,112	-21,40	286										401	82,500	600	35,005			1,496	1,200		-20,8255
168	112	-11,90	552										401	450,990					1,496			-10,6775
169	113	-11,50	215	295	88,950					2,034												-10,6585
170	113	-13,80	235	295	160,910					2,034												-12,4073
171	114,115	-12,80	582	295	63,130					2,034			292	195,730					2,055			-11,8893
172	115,116	-12,20	354	260	38,905	295	109,270			2,308	2,034											-11,3196
173	116	-7,40	214	260	38,905					2,308												-6,9905
174	117	-13,80	350	1200	71,180					0,500												-13,6993
175	118	-12,90	454	305	104,680					1,967												-12,4468
176	118,119,120,121	-10,20	745	360	95,560	630	267,830	305	30,000	1,667	0,952	1,967	10000	48,940					0,060			-9,5607
177	122	-8,05	201										228	138,880					2,632			-6,2317
178	122	-8,30	320										228	70,440					2,632			-7,7207
179	123,124	-6,00	221	10000	37,000					0,060			208	92,000					2,885			-4,7891
180	125,126	-6,86	431	5000	41,000					0,120			201	166,500					2,985			-5,6954
181	126	-6,00	48										201	48,000					2,985			-3,0149
182	127,128	-3,50	153										567	6,000	225	33,230			1,058	2,667		-2,8793
183	129	-2,12	333										10000	13,580					0,060			-2,1176
184	129,130	-1,78	127	5000	0,820					0,120			10000	19,940					0,060			-1,7698
185	130,131	-6,30	48	300	33,230	5000	14,770			2,000	0,120											-4,8785
186		-6,10	200																			-6,1000
187	132	-15,00	168	300	33,230					2,000												-14,6044
188		-6,50	44																			-6,5000
189		-1,99	44																			-1,9900
190	133	-2,84	111										9999	15,260					0,067			-2,8398

Obrázek 2.1: Ukázka tabulkového zpracování redukovaného sklonu

2.1.2 Výpočet rozhodného stoupání a spádu

Rozhodné stoupání

Rozhodné stoupání je důležité nejen pro řešení dopravních situací, ale i pro další výpočty. Uvažuje se jako průměrný vážený sklon na délce 1 000 m pro i-tý úsek. Počítá se pro oba směry a výsledné rozhodné stoupání je maximem ze všech rozhodných stoupání. [7]

Ze vzorce pro rozhodné stoupání (1.7) je patrné, že hlavním parametrem je redukovaný sklon a následně délka sklonového úseku, protože délka všech úseků pro jeden krok odpovídá právě délce 1 000 m. Není tudíž nutné počítat rozhodné stoupání pro všechny úseky, ale stačí se zaměřit na úseky o redukovaném sklonu vyšším než 20 ‰.

Ukázka výpočtu rozhodného stoupání ve směru Jeseník – Zábřeh na Moravě pro 62. sklonový úsek:

$$\begin{aligned}
 s_{rk_{62}} &= \frac{\sum_{i=62}^{66} s_{r_i} \cdot l_i}{l_{rk}} \\
 &= \frac{s_{r_{62}} \cdot l_{62} + s_{r_{63}} \cdot l_{63} + s_{r_{64}} \cdot l_{64} + s_{r_{65}} \cdot l_{65} + s_{r_{66}} \cdot (1000 - l_{62} - l_{63} - l_{64} - l_{65})}{1000} \\
 &= \frac{27,2198 \cdot 446 + 23,0157 \cdot 220 + 29,3515 \cdot 100 + 26,1312 \cdot 154}{1000} \\
 &+ \frac{27,1258 \cdot (1000 - 446 - 220 - 100 - 154)}{1000} = 26,9929 ‰
 \end{aligned}$$

(Z důvodu velikosti výpočtu je rovnice rozdělena na dva zlomky)

Ukázka výpočtu rozhodného stoupání ve směru Zábřeh na Moravě – Jeseník pro 62. sklonový úsek:

$$\begin{aligned}
 s_{rk_{62}} &= \frac{\sum_{i=62}^{58} s_{r_i} \cdot l_i}{l_{rk}} \\
 &= \frac{s_{r_{62}} \cdot l_{62} + s_{r_{61}} \cdot l_{61} + s_{r_{60}} \cdot l_{60} + s_{r_{59}} \cdot l_{59} + s_{r_{58}} \cdot (1000 - l_{62} - l_{61} - l_{60} - l_{59})}{1000} \\
 &= \frac{27,2198 \cdot 446 + 27,7723 \cdot 148 + 27,2000 \cdot 236 + 26,1974 \cdot 84}{1000} \\
 &+ \frac{22,8709 \cdot (1000 - 446 - 148 - 236 - 84)}{1000} = 26,8370 \text{ ‰}
 \end{aligned}$$

Ukázka tabulkového zpracování rozhodného stoupání je zobrazena na obrázku níže.

<i>i</i>	<i>l_i</i> [m]	<i>s_r</i> [‰]	<i>s_{rki} ↓</i> [‰]	<i>s_{rki} ↑</i> [‰]
49	258	26,1732	26,0703	22,8143
50	79	22,4832	26,0067	24,1667
51	55	27,8332	26,2496	25,2904
52	262	25,7081	26,2876	26,0897
53	77	28,2332	26,4833	26,1952
54	199	26,3591	26,3436	26,0950
55	170	26,5088	26,5109	26,1038
56	256	25,5582	26,7131	26,2063
57	155	30,0909	27,1385	26,8092
58	119	22,8709	26,6935	26,4715
59	84	26,1974	27,1075	26,3611
60	236	27,2000	27,0922	26,5247
61	148	27,7723	27,1562	26,7117
62	446	27,2198	26,9929	26,8370
63	220	26,0157	26,9222	27,0330
64	100	29,3515	26,9765	27,2481
65	154	26,1312	26,7142	27,0446
66	499	27,1258	26,8061	26,9535
67	180	26,0591	26,0971	26,9288
68	417	26,7279	26,1812	26,7679
69	194	28,5237	26,3255	27,0391
70	94	23,5172	26,0442	26,6999
71	134	24,8842	26,2574	26,0178

Obrázek 2.2: Ukázka tabulkového zpracování pro rozhodné stoupání

Výsledné rozhodné stoupání činí 27,2481 ‰.

Rozhodný spád

Rozhodný spád je opakem rozhodného stoupání, jedná se tedy o hledané minimum všech rozhodných spádů a počítá se dle vzorce (1.8). Hlavním parametrem oproti rozhodnému stoupání je sklon úseku. Postup výpočtu je totožný, nicméně kromě nahrazení redukovaného sklonu sklonem úseku se nahrazuje délka úseku 1 000 m zábrzdou vzdáleností, která činí 700 m.

Ukázka výpočtu rozhodného spádu ve směru Jeseník – Zábřeh na Moravě pro 107. sklonový úsek:

$$\begin{aligned}
 s_{rz110} &= \frac{\sum_{i=107}^{110} s_i \cdot l_i}{l_{zb}} \\
 &= \frac{s_{107} \cdot l_{107} + s_{108} \cdot l_{108} + s_{109} \cdot l_{109} + s_{110} \cdot (700 - l_{107} - l_{108} - l_{109})}{700} \\
 &= \frac{-26,62 \cdot 225 + (-24,70) \cdot 270 + (-4,18) \cdot 201 + (-24,44) \cdot (700 - 225 - 270 - 201)}{700} \\
 &= -19,42 \text{ ‰}
 \end{aligned}$$

Ukázka výpočtu rozhodného stoupání ve směru Zábřeh na Moravě – Jeseník pro 107. sklonový úsek:

$$\begin{aligned}
 s_{rz110} &= \frac{\sum_{i=107}^{104} s_i \cdot l_i}{l_{zb}} \\
 &= \frac{s_{107} \cdot l_{107} + s_{106} \cdot l_{106} + s_{105} \cdot l_{105} + s_{104} \cdot (700 - l_{107} - l_{106} - l_{105})}{700} \\
 &= \frac{-26,62 \cdot 225 + (-28,13) \cdot 300 + (-23,20) \cdot 150 + (-28,20) \cdot (700 - 225 - 300 - 150)}{700} \\
 &= -26,59 \text{ ‰}
 \end{aligned}$$

Ukázka tabulkového zpracování rozhodného spádu je zobrazena na obrázku níže.

<i>i</i>	<i>s_i</i> [‰]	<i>l_i</i> [m]	<i>s_{zzi}</i> [‰]	<i>s' zzi</i> [‰]
100	-28,96	278	-29,0944	-18,8948
101	-28,38	225	-27,6329	-26,8348
102	-30,10	275	-27,3964	-29,2214
103	-23,40	200	-25,7421	-27,6329
104	-28,20	200	-26,9857	-27,5814
105	-23,20	150	-26,4657	-26,1643
106	-28,13	300	-26,7871	-26,7557
107	-26,62	225	-19,4235	-26,5907
108	-24,70	270	-20,1168	-26,3216
109	-4,18	201	-20,4711	-19,4446
110	-24,44	59	-27,2821	-19,2522
111	-30,18	220	-27,5424	-20,5082
112	-24,25	200	-26,4650	-20,3796
113	-27,90	250	-27,2779	-27,4254
114	-27,17	150	-23,6194	-27,0264
115	-26,25	200	-20,0562	-26,7507
116	-27,94	170	-19,3319	-27,2819
117	-15,17	145	-19,0066	-24,6449
118	-7,39	160	-21,5255	-20,0873
119	-26,30	125	-26,0832	-20,0634
120	-21,13	120	-25,9676	-19,1374
121	-27,33	490	-26,9980	-26,1347

Obrázek 2.3: Ukázka tabelárního zpracování pro rozhodný spád

Výsledný rozhodný spád činí 29,2214 ‰.

2.2 Výběr hnacích vozidel

Na základě analýzy traťových poměrů na úseku Jeseník – Zábřeh na Moravě lze vybrat hnací vozidla pro provoz na trati. Provozem na trati se v této práci rozumí nákladní doprava.

2.2.1 Hnací vozidlo nezávislé vozby

Hnacím vozidlem nezávislé vozby je dieselová lokomotiva řady 742.0, která je v současnosti na trati dle grafikonu vlakové dopravy platného od 9. prosince 2018 používána jako hnací vozidlo manipulačních vlaků.

Lokomotiva řady 742.0, dříve T466.2, je hnací vozidlo nezávislé trakce s výkonem přenášeným elektrickým stejnosměrným proudem. Jedná se o čtyřnápravovou lokomotivu s uspořádáním pojezdu Bo'Bo', která může sloužit i k posunu. Jedná se tedy o univerzální lokomotivu, vyrobenou v 70–80. letech 20. století. [9]

Technické údaje lokomotivy jsou uvedeny v následující tabulce.

Tabulka 2.1: Technické údaje lokomotivy řady 742.0

Výrobce	ČKD Praha
Délka přes nárazníky	13 580 mm
Výška	4 472 mm
Šířka	3 130 mm
Rozvor	2 400 mm
Vzdálenost otočných čepu	6 700 mm
Minimální poloměr oblouku	120 m
Hmotnost	64 t
Typ spalovacího motoru	K 6 S 230 DR
Objem spalovacího motoru	64,8 l
Vrtání	230 mm
Zdvih	260 mm
Otáčky – volnoběh	510 ot/min
Otáčky – jmenovité	1 250 ot/min
Objem nádrže	4 000 l
Typ trakčních motorů	TE 005 E
Maximální tažná síla	192 kN
Trvalá tažná síla	121 kN
Trvalý výkon SM	883 kW
Maximální rychlost	90 km/h

Lokomotiva řady 742.0 je zobrazena na obrázku níže.



Obrázek 2.4: Lokomotiva řady 742.0 [10]

2.2.2 Hnací vozidlo závislé vozby

Jako hnací vozidlo závislé vozby byla vybrána lokomotiva řady 163, dříve E 499.3. Důvodem výběru této lokomotivy je stále častější používání této řady v nákladní dopravě, kde nahrazuje zastaralou řadu lokomotiv 181, která je na hraně své životnosti. Mimo jiné podvozky této zastaralé řady při průjezdu obloukem obrušují vnitřní hrany kolejnic. [11]

Lokomotiva řady 163 je čtyřnápravové hnací vozidlo s uspořádáním pojezdu Bo'Bo', která může sloužit k nákladní i osobní dopravě. Tato řada byla vyráběna v 80. a 90. letech minulého století.

Její technické údaje jsou uvedeny v tabulce níže.

Tabulka 2.2: Technické údaje lokomotivy řady 163

Výrobce	ŠKODA Plzeň
Délka přes nárazníky	1 6800 mm
Výška	4 640 mm
Šířka	2 940 mm
Rozvor	3 200 mm
Vzdálenost otočných čepu	8 300 mm
Minimální poloměr oblouku	120 m
Hmotnost	84 t
Typ trakčních motorů	Al 4542 FiR
Trvalý proud TM	715 A

Hodinový proud TM	750 A
Jmenovité napětí na svorkách TM	1 300 V
Trvalá tažná síla	177 kN
Maximální tažná síla	285 kN
Trvalý výkon	3 480 kW
Maximální rychlost	120 km/h
Trakční systém	3 kV

Lokomotiva řady 163 je zobrazena na obrázku níže.



Obrázek 2.5: Lokomotiva řady 163 [12]

2.3 Výpočet normativů hmotnosti pro hnací vozidlo E499.3

Pro všechny normativy je třeba znát velikost odporů, tažné síly na obvodu kol, případně na spřáhle. Ve vozebních výpočtech je třeba odpory vztáhnout na jednotku tíhy vozidla, která se označuje jako součinitel.

Při určování tažné síly na obvodu kol z trakční charakteristiky je počítáno s ideální trakční křivkou. Určené hodnoty tedy odpovídají hodnotám na mezi adheze. V praxi se normativ hmotnosti určuje jako nejmenší hodnota ze všech normativů hmotnosti.

U všech výpočtů normativů se objevuje tíha hnacího vozidla a tíha vozidel tažených, která je konstantní, a můžeme proto psát:

Tíha hnacího vozidla:

Obecně je tíha vyjádřena jako součin hmotnosti a tíhového zrychlení. Pro tíhnu hnacího vozidla můžeme psát:

$$G_L = m_L \cdot g = 84 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 824\,040\, N$$

kde:

G_L [N] tíha hnacího vozidla,

m_L [kg] hmotnost lokomotivy,

g [$m \cdot s^{-2}$] gravitační zrychlení.

Tíha tažených vozidel:

$$G_D = m_D \cdot g = 300 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 2\,943\,000\, N$$

kde:

G_D [N] tíha tažených vozidel,

m_D [kg] hmotnost tažených vozidel.

2.3.1 Technický normativ hmotnosti

Technický normativ pro hnací vozidlo řady 163 stanovíme dle vztahu (1.16):

$$\begin{aligned} M_T &= \frac{F_O - G_L \cdot o_L - G_L \cdot o_T}{g \cdot (o_D + o_T)} \cdot 10^{-3} \\ &= \frac{156000 - 824040 \cdot 0,00824 - 824040 \cdot 0,02725}{9,81 \cdot (0,00333 + 0,02725)} \cdot 10^{-3} \cong \mathbf{423\, t} \end{aligned}$$

kde velikost tažné síly na obvodu kol $F_O = 156\,000\, N$ byla určena na základě trakční charakteristiky uvedené na obrázku Obrázek 2.9: Trakční charakteristika vozidla . Vozidlové odpory o_L a o_D jsou spočteny pro traťovou rychlost $V = 80\, km \cdot h^{-1}$, již uvádí grafikon SŽDC, podle vzorce (1.10):

$$o_L = a + b \cdot V + c \cdot V^2 = 2,8 \cdot 10^{-3} + 0 \cdot 80 + 8,5 \cdot 10^{-7} \cdot 80^2 = 0,00824$$

kde hodnoty koeficientů a , b , c pro hnací vozidlo jsou:

$$a \quad 2,8 \cdot 10^{-3}$$

$$b \quad 0$$

$$c \quad 8,5 \cdot 10^{-7}$$

$$o_D = a + b \cdot V + c \cdot V^2 = 1,80 \cdot 10^{-3} + 5,00 \cdot 10^{-7} \cdot 80 + 2,33 \cdot 10^{-7} \cdot 80^2 = 0,00333$$

kde hodnoty koeficientů a, b, c pro tažené vozy jsou:

a $1,80 \cdot 10^{-3}$

b $5,00 \cdot 10^{-7}$

c $2,33 \cdot 10^{-7}$

Součinitel odporu trati odpovídá hodnotě rozhodného stoupání, která je uvedena v promilích a proto ji je potřeba převést. Pro hodnotu rozhodného stoupání vypočtenou v oddíle 2.1.2 tedy můžeme psát:

$$o_T = \frac{s_{rk}}{1000} = \frac{27,2481}{1000} = 0,02725$$

2.3.2 Rozjezdový normativ hmotnosti

Pro rozjezdový normativ hnacího vozidla řady 163 můžeme dle vzorce (1.17) psát:

$$M_R = \frac{F_{spR} - G_L \cdot o_T}{o_D + o_T + o_R} \cdot \frac{10^{-3}}{g} = \frac{235692,7 - 824040 \cdot 0,02725}{0,0018 + 0,02725 + 0,0015} \cdot \frac{10^{-3}}{9,81} \cong \mathbf{711\ t}$$

kde F_{spR} odpovídá velikosti tažné síly na obvodu kol zkrácené o vozidlový odpor hnacího vozidla při rozjezdu. Při rozjezdu je tažná síla na obvodu kol rovna $F_O = 238\ 000\ \text{N}$. Pro vozidlový odpor hnacího vozidla při rozjezdu můžeme dle vzorce (1.10) psát:

$$o_L = a + b \cdot V + c \cdot V^2 = 2,8 \cdot 10^{-3} + 0 \cdot 0 + 8,5 \cdot 10^{-7} \cdot 0^2 = 0,00280$$

kde koeficienty a, b, c jsou stejné jako u technického normativu hmotnosti. Následně pro tažnou sílu na spřáhle můžeme psát:

$$F_{spR} = F_O - o_L \cdot G_L = 238000 - 0,0028 \cdot 824040 = 235\ 692,7\ \text{N}$$

Součinitel vozidlového odporu tažených vozidel je vypočten dle stejného principu. Součinitel odporu trati je neměnný a velikost součinitele rozjezdového odporu je stanovena dle literatury $o_R = 1,5 \cdot 10^{-3}$.

2.3.3 Průjezdový normativ hmotnosti

Průjezdový normativ stanovíme dle vztahu (1.19):

$$M_P = \frac{F_{spP} - G_L \cdot o_T}{o_D + o_T} \cdot \frac{10^{-3}}{g} = \frac{215535,1 - 824040 \cdot 0,02725}{0,00186 + 0,02725} \cdot \frac{10^{-3}}{9,81} \cong \mathbf{676\ t}$$

Veličiny jsou spočteny obdobně, jako v předchozím případě s rozdílnou rychlostí. Průjezdová rychlost byla stanovena na $V_p = 15\ \text{km} \cdot \text{h}^{-1}$.

2.3.4 Náběhový technický normativ hmotnosti

Jelikož se na trati nenachází, žádné strmé krátké stoupání, které by vlak překonal pomocí vlastní kinetické energie, není normativ příliš podstatný. Trať má souvislé stoupání, proto za náběhový úsek považujeme nejkratší část strmého stoupání, který činí $l_n = 3\,881$ m. Následně pro náběhový technický normativ hmotnosti můžeme dle vzorce (1.21) psát:

$$M_N = \frac{10^{-3}}{g} \cdot \frac{F_{spN} - G_L \cdot \left(o_T - \frac{1+\rho}{g} \cdot \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot 3,6^2} \cdot \frac{1}{l_n} \right)}{\overline{o_D} + o_T + \frac{1+\rho}{g} \cdot \frac{V_2^2 - V_1^2}{2 \cdot 3,6^2} \cdot \frac{1}{l_n}}$$

$$= \frac{10^{-3}}{9,81} \cdot \frac{177561,2 - 824040 \cdot \left(0,02725 - \frac{1+0,06}{9,81} \cdot \frac{80^2 - 20^2}{2 \cdot 3,6^2} \cdot \frac{1}{3881} \right)}{0,00262 + 0,02725 + \frac{1+0,06}{9,81} \cdot \frac{80^2 - 20^2}{2 \cdot 3,6^2} \cdot \frac{1}{3881}} \cong 450 \text{ t}$$

kde F_{spN} a $\overline{o_D}$ jsou střední hodnoty stanovené pro rychlosti $V_1 = 20 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ a $V_2 = 80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

2.3.5 Výsledný normativ hmotnosti

Výsledný normativ hmotnosti je hledané minimum ze všech spočtených normativů. Můžeme tedy psát:

$$M = \min(M_t; M_R; M_P; M_N) = \min(423; 711; 676; 450) = 423 \text{ t}$$

Rozhodným normativem hmotnosti je technický normativ hmotnosti o velikosti 423 t.

2.4 Výpočet parametrů pohybu vlaků

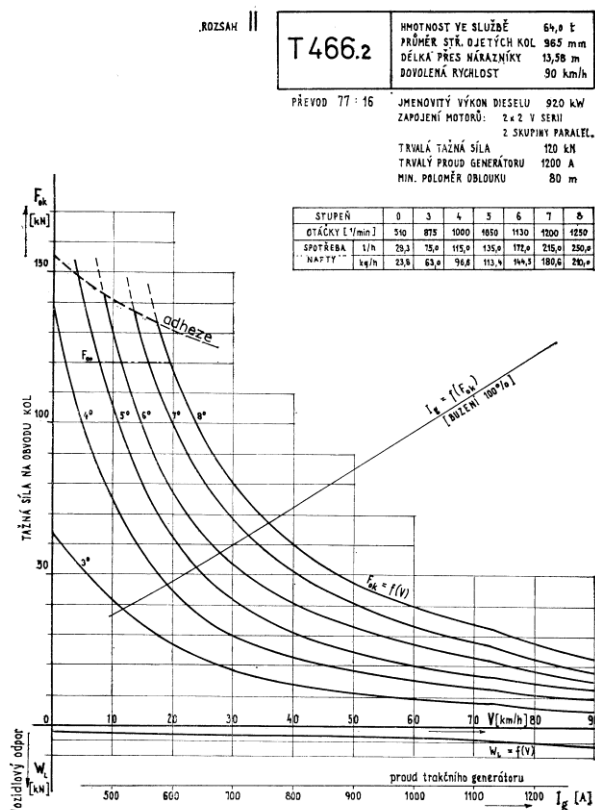
Výpočtem parametrů pohybu vlaků se rozumí sestavení tachogramu jízdy vlaku, a to pro závislou a nezávislou vozbu, které budou následně porovnány. Hnací vozidla pro vozby byla vybrána v kapitole 2.2 (lokomotivy řady 742.0 a 163). Podklady pro tachogram jsou úplná trakční charakteristika těchto hnacích vozidel, parametry tratě vypočtené v oddíle 2.1.1, tíha hnacích a tažených vozidel a jejich vozidlový odpor. Pro výpočet tíhy tažených vozidel uvažujeme jejich hmotnost 300 t, což odpovídá hmotnosti tažených vozidel manipulačního vlaku, který je na trati provozován dle poskytnutého GVD (grafikon vlakové dopravy). Při tvorbě tachogramu neuvažujeme žádné prostoje vlaku. Tachogram je sestavován pro traťovou rychlost $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Vypočtené hodnoty jsou pouze teoretické a odpovídají zvolenému jízdnímu režimu.

Rozhodujícím úsekem trati pro porovnání je úsek mezi Jeseníkem a Ramzovou, kde se nachází stoupání o délce 15 338 m a převýšení 305 m.

2.4.1 Tachogram jízdy pro hnací vozidlo řady 742.0

Tachogram je sestavován pro hnací vozidlo řady 742.0, dříve T466.2, které veze zátěž hmotnosti 300 t. Pro jeden krok tachogramu při jízdě silou jsou zjišťovány hodnoty vozidlového odporu hnacího vozidla a vozidel tažených, přírůstek rychlosti, rychlost vlaku, dále střední rychlost, tažná síla, přírůstek ujeté dráhy, ujetá dráha vlaku a spotřeba nafty. Jeden krok trvá deset sekund, tedy $\Delta t_i = 10$ s. Dalším vstupním parametrem je redukovaný sklon.

Na obrázku níže je zobrazena úplná trakční charakteristika pro tuto řadu.



Obrázek 2.6: Trakční charakteristika řady 742.0 [13]

Výpočet tíhy hnacího vozidla. Hmotnost lokomotivy je určena z technických údajů uvedených v oddíle 2.2.1, proto můžeme psát:

$$G_L = m_L \cdot g = 64 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 627\,840 \text{ N}$$

Tíha tažených vozidel:

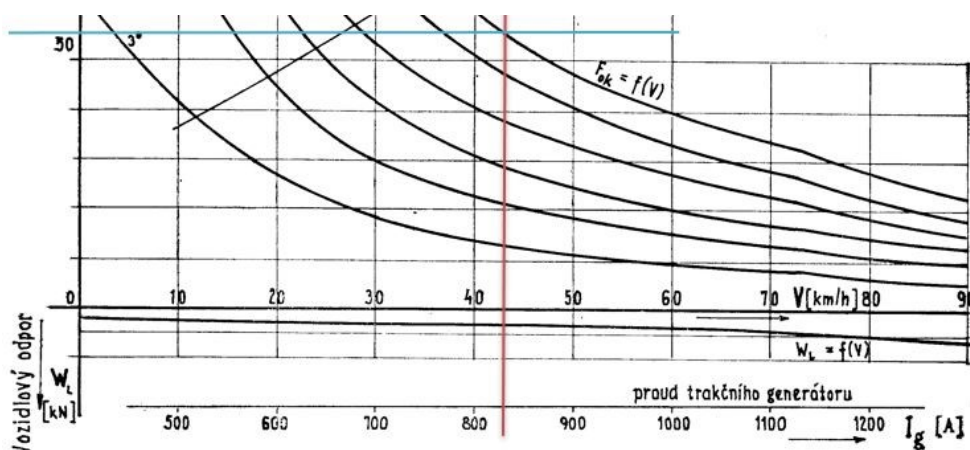
$$G_D = m_D \cdot g = 300 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 2\,943\,000 \text{ N}$$

Příklad výpočtu tachogramu závislé vozby pro desátý krok při jízdě silou, o časovém kroku $\Delta t_i = 10$ s, na redukovaném sklonu $s_r = 12,89$ ‰, při zařazeném 8. rychlostním stupni. Vstupními parametry z předcházejícího kroku jsou:

$$V_9 = 43,21 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$l_9 = 674,01 \text{ m}$$

Z trakční charakteristiky je zjištěna hodnota tažné síly F_O při rychlosti V_9 . Ukázka na obrázku níže.



Obrázek 2.7: Zjištění tažené síly F_O pro 10. krok

Zjištěná tažná síla odpovídá velikosti $F_O = 56\,700$ N

Následně dle vztahu (1.10) můžeme pro výpočet **vozidlového odporu hnacího vozidla**, respektive tažených vozů psát:

$$o_L = a + b \cdot V + c \cdot V^2 = 2,8 \cdot 10^{-3} + 0 \cdot 43,21 + 8,5 \cdot 10^{-7} \cdot 43,21^2 = 4,39 \cdot 10^{-3}$$

$$\begin{aligned} o_D &= a + b \cdot V + c \cdot V^2 = 1,70 \cdot 10^{-3} + 3,30 \cdot 10^{-6} \cdot 43,21 + 1,80 \cdot 10^{-7} \cdot 43,21^2 \\ &= 2,19 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Přírůstek rychlosti se spočte dle vztahu (1.26):

$$\begin{aligned} \Delta v_i &= \frac{g}{(1 + \rho)} \cdot \frac{F_O - G_L \cdot o_L - G_D \cdot o_D - (G_L + G_D) \cdot o_T}{G_L + G_D} \cdot \Delta t_i \\ &= \frac{9,81}{(1 + 0,06)} \cdot \frac{56700 - 627840 \cdot 4,39 \cdot 10^{-3} - 2943000 \cdot 2,19 \cdot 10^{-3} - (627840 + 2943000) \cdot \frac{12,89}{1000}}{627840 + 2943000} \\ &\cdot 10 \cdot 3,6 = 0,14 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} \end{aligned}$$

Rychlost vlaku v tomto kroku bude stanovena dle vztahu (1.27):

$$v_{10} = v_{10-1} + \Delta v_{10} = 43,21 + 0,14 = 43,35 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

Přírůstek ujeté dráhy stanovíme ze vztahu (1.28):

$$\Delta l_{10} = v_{s10} \cdot \Delta t_i = \frac{v_{10} + v_{10-1}}{2} \cdot \Delta t_i = \frac{43,35 + 43,21}{2} \cdot \frac{1}{3,6} \cdot 10 = 120,22 \text{ m}$$

Celková ujetá dráha v 10. kroku se spočte dle vztahu (1.29):

$$l_{10} = l_{10-1} + \Delta l_{10} = 674,01 + 120,22 = 794,23 \text{ m}$$

Výpočet spotřeby motorové nafty:

Z trakční charakteristiky je dáno, že na osmém rychlostním stupni má lokomotiva spotřebu 250 l za hodinu. Pro spotřebu v 10. kroku můžeme tedy psát:

$$q_{10} = 250 = 250 \cdot \frac{10}{3600} = 0,69 \text{ l} \cdot 10 \text{ s}^{-1}$$

Ukázka tabulkového zpracování tachogramu řady 742.0 je zobrazena na obrázku níže.

<i>i</i>	Δt_i	OL	OD	V_{i-1}	ΔV_i	V_i	V_s	F_o	Δl_i	l_i	s_r	RS	Q spotřeba
	[s]	[N]	[N]	[km·h ⁻¹]	[km·h ⁻¹]	[km·h ⁻¹]	[km·h ⁻¹]	N	[m]	[m]	[‰]		[l]
0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,0000	0	
1	10	1,76E+03	5,00E+03	0,00	4,72	4,72	2,36	64000	6,56	6,56	1,8501	3	0,20833
2	10	1,77E+03	5,06E+03	4,72	8,03	12,75	8,74	99500	24,28	30,84	1,8501	4	0,31944
3	10	1,84E+03	5,21E+03	12,75	7,08	19,83	16,29	89500	45,26	76,09	1,8501	5	0,37500
4	10	1,97E+03	5,40E+03	19,83	6,11	25,94	22,89	79500	63,57	139,67	1,8501	6	0,47778
5	10	2,12E+03	5,61E+03	25,94	7,02	32,97	29,45	81000	81,82	221,48	-0,5600	7	0,59722
6	10	2,34E+03	5,90E+03	32,97	6,04	39,01	35,99	71000	99,97	321,45	-0,5600	8	0,69444
7	10	2,57E+03	6,19E+03	39,01	3,76	42,77	40,89	61000	113,59	435,04	3,3300	8	0,69444
8	10	2,73E+03	6,39E+03	42,77	0,27	43,04	42,91	58000	119,18	554,22	12,8900	8	0,69444
9	10	2,75E+03	6,40E+03	43,04	0,17	43,21	43,12	57000	119,79	674,01	12,8900	8	0,69444
10	10	2,75E+03	6,41E+03	43,21	0,14	43,35	43,28	56700	120,22	794,23	12,8900	8	0,69444
11	10	2,76E+03	6,42E+03	43,35	0,47	43,82	43,59	56500	121,07	915,31	11,8300	8	0,69444
12	10	2,78E+03	6,45E+03	43,82	0,42	44,25	44,03	56000	122,32	1037,63	11,8300	8	0,69444
13	10	2,80E+03	6,47E+03	44,25	-0,26	43,98	44,11	54500	122,54	1160,17	13,4600	8	0,69444
14	10	2,79E+03	6,45E+03	43,98	-0,08	43,90	43,94	56450	122,06	1282,23	13,4600	8	0,69444
15	10	2,79E+03	6,45E+03	43,90	-0,08	43,82	43,86	56470	121,84	1404,07	13,4600	8	0,69444
16	10	2,78E+03	6,45E+03	43,82	0,32	44,14	43,98	56500	122,17	1526,24	12,2900	8	0,69444
17	10	2,80E+03	6,46E+03	44,14	0,07	44,21	44,18	56100	122,71	1648,95	12,9000	8	0,69444
18	10	2,80E+03	6,47E+03	44,21	0,06	44,27	44,24	56000	122,90	1771,85	12,9000	8	0,69444
19	10	2,80E+03	6,47E+03	44,27	-1,65	42,63	43,45	56000	120,70	1892,54	18,0300	8	0,69444

Obrázek 2.8: Ukázka tabelárního zpracování tachogramu hnacího vozidla T 466.2 na zadané trati

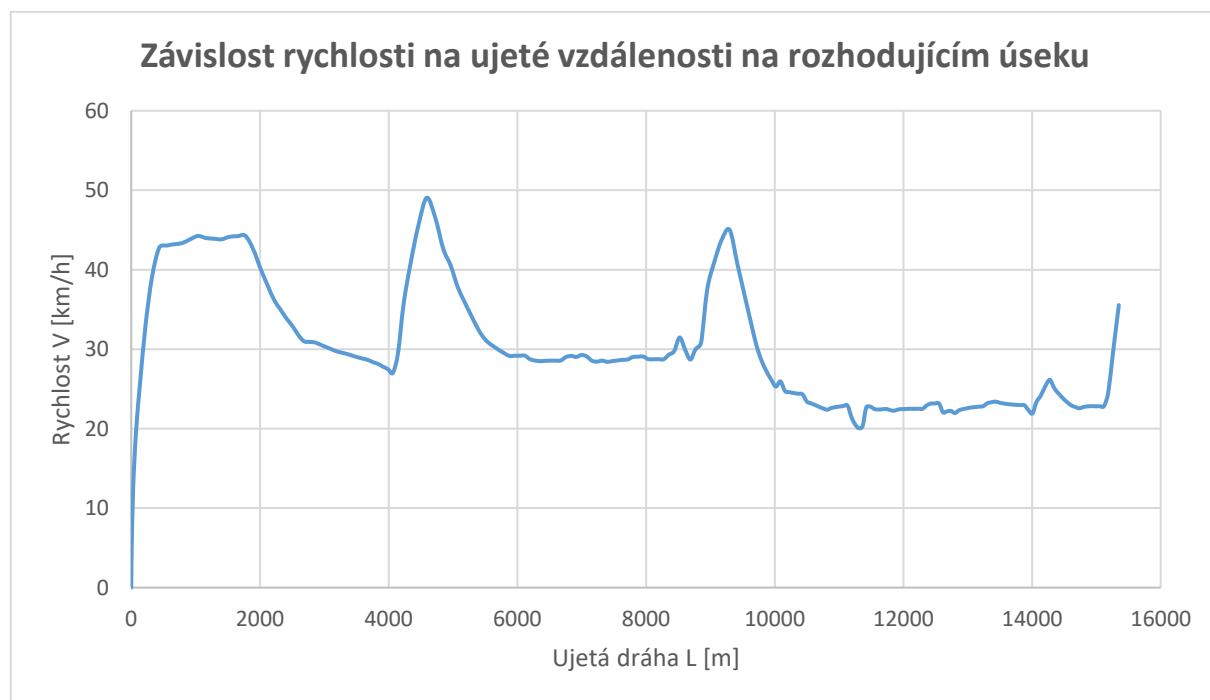
Vyhodnocení tachogramu:

V první fázi tachogramu mezi stanicemi Jeseník a Ramzová jede vlak jízdním režimem jízda silou, aby bylo dosahováno co nejvyšší rychlosti, tudíž nejkratšího možného času jízdy. Následně na konci stoupání ve stanici Ramzová, kde se jízda do stoupání mění v jízdu po spádu, vlak přechází do režimu jízda konstantní rychlostí, aby byla dodržována traťová rychlost 80 km · h⁻¹.

Kompletně zpracovaný tachogram pro rozhodující úsek se nachází v příloze č. 1.

Výsledkem tachogramu je zjištěný čas jízdy vlaku ze stanice výchozí do stanice cílové, který činí **70,43** minut. Tato jízdní doba je pouze teoretická pro případ plynulé, nepřerušované jízdy vlaku, při snaze dosáhnout maxima traťové rychlosti v celém průběhu jízdy.

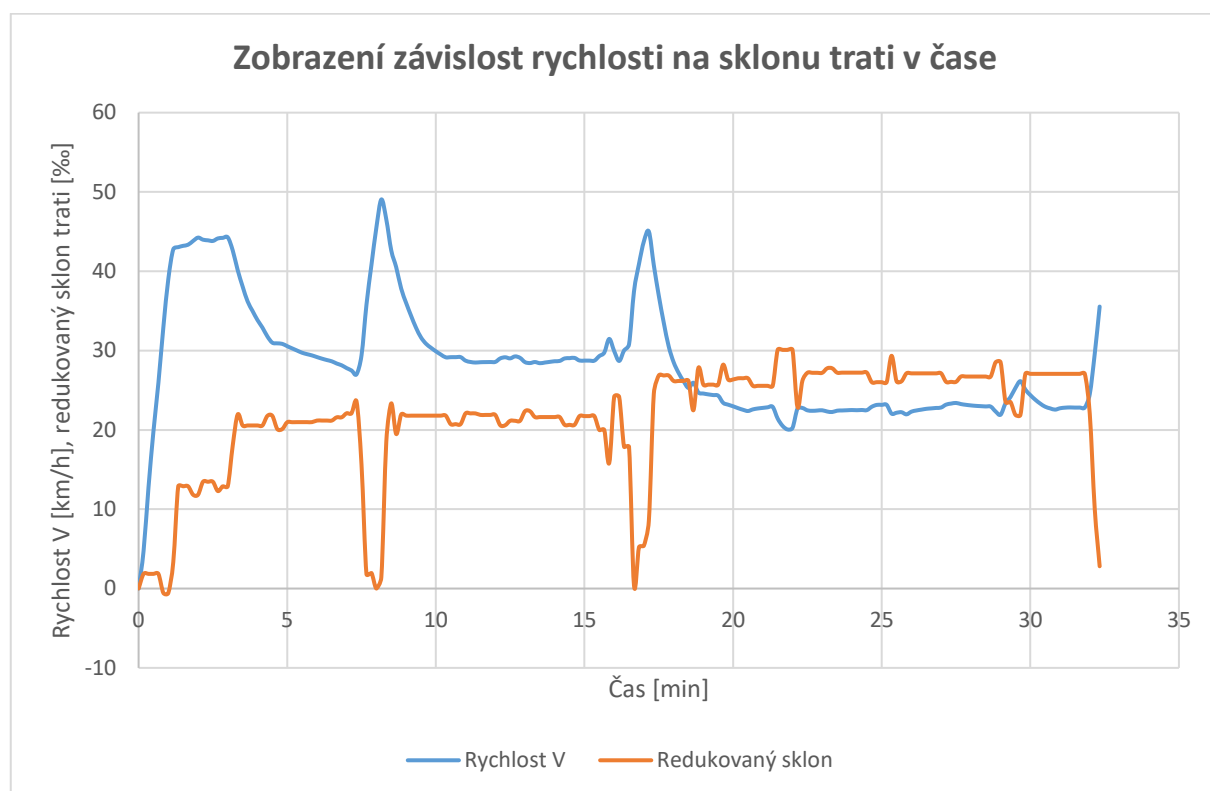
Dalším ukazatelem je vývoj rychlosti vlaku vzhledem k ujeté vzdálenosti na rozhodujícím úseku, kde se nachází největší souvislé stoupání. Vývoj rychlosti vzhledem k ujeté dráze je zobrazen v grafu níže.



Graf 2.1: Závislost rychlosti na ujeté vzdálenosti pro řadu 742.0

Z grafu je patrné, že vlak není na rozhodujícím úseku schopen dosáhnout požadované rychlosti. Průměrná rychlost na tomto úseku činí $28,58 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$.

Dalším zobrazením je závislost rychlosti na sklonu trati, který je vyjádřen pomocí redukovaného sklonu v čase. Tato závislost je zobrazena v grafu níže.



Graf 2.2: Závislost rychlosti na sklonu trati v čase pro řadu 742.0

Z grafu můžeme vypořadovat závislost rychlosti na sklonu trati, která se projevuje snížením rychlosti i přes maximální výkon spalovací motoru, pro dosažení co nejvyšší rychlosti.

2.4.2 Energetická náročnost hnacího vozidla řady 742.0

Energetická náročnost neboli spotřeba paliva pro hnací vozidlo řady 742.0, dříve T466.2, byla stanovena dle tachogramu spočteného v oddíle 2.4.1, který vychází z trakční charakteristiky vozidla.

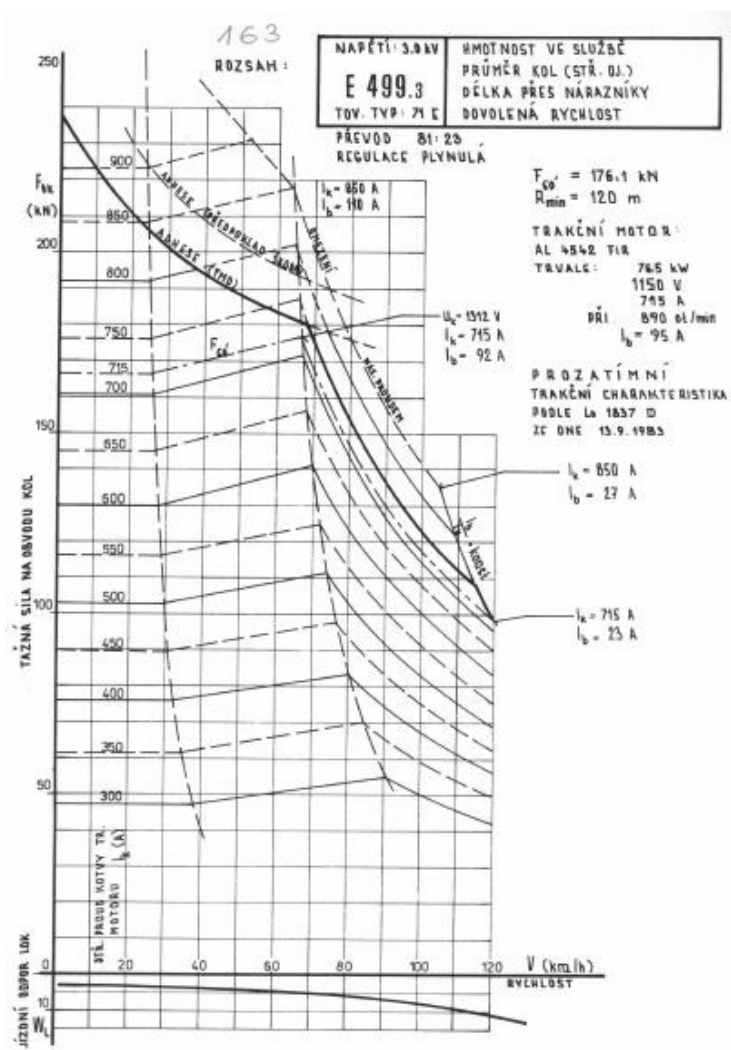
Celkovou spotřebu stanovíme dle vztahu (1.39). Z důvodů velikosti výpočtu (405 kroků) je zde uveden pouze výsledek. Celý výpočet je uveden v příloze č. 1.

Celková teoretická spotřeba, při snaze dodržet traťovou rychlost po celou dobu jízdy, činí 218,35 l na 65,2 km trati. Průměrná spotřeba na 100 km činí 334,89 l. Nicméně vzhledem k profilu trati spotřeba není rovnoměrně rozložena. Nejvyšší spotřeba byla zjištěna na stoupání trati, které je dlouhé zhruba 15 km. Po zbytek trati vozidlo jede po spádu.

2.4.3 Tachogram jízdy pro hnací vozidlo řady 163

Tachogram je sestavován pro hnací vozidlo řady 163,3, dříve E499.3, která veze zátěž hmotnosti 300 t. Tachogram je sestavován dle stejných podmínek jako tachogram pro závislou vozbu.

Na obrázku níže je zobrazena úplná trakční charakteristika pro tuto řadu.



Obrázek 2.9: Trakční charakteristika vozidla řady 163

Energetická charakteristika hnacího vozidla E499.3 se nachází v přílohách na přiloženém disku.

Výpočet tíhy hnacího vozidla. Hmotnost lokomotivy je určena z technických údajů uvedených v oddíle 2.2.12, proto můžeme psát:

$$G_L = m_L \cdot g = 84 \cdot 10^3 \cdot 9,81 = 824\,040 \text{ N}$$

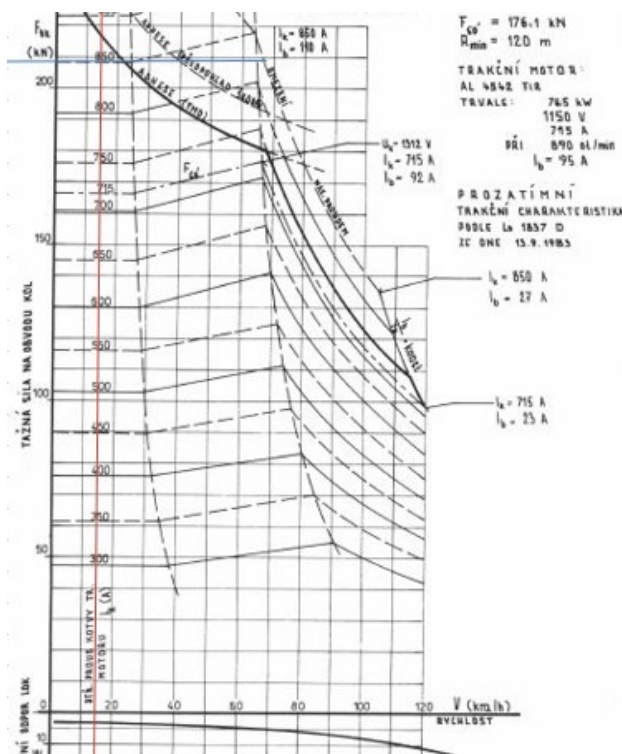
Tíha vozidel tažených je stejná jako v oddíle 2.4.1.

Příklad výpočtu tachogramu závislé vozby pro druhý krok při jízdě silou, o časovém kroku $\Delta t_i = 10$ s, na redukovaném sklonu $s_r = 1,85$ ‰. Vstupními parametry z předcházejícího kroku jsou:

$$V_1 = 16,43 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

$$l_1 = 22,81 \text{ m}$$

Z trakční charakteristiky je zjištěna hodnota tažné síly F_O při rychlosti V_1 :



Obrázek 2.10: Zjištění tažné síly F_O pro 2. krok

Zjištěná tažná síla odpovídá velikosti $F_O = 209\,000$ N.

Následně dle vztahu (1.10) můžeme pro výpočet **vozidlového odporu hnacího vozidla**, respektive tažených vozů psát:

$$o_L = a + b \cdot V + c \cdot V^2 = 2,8 \cdot 10^{-3} + 0 \cdot 16,43 + 8,5 \cdot 10^{-7} \cdot 16,43^2 = 3,03 \cdot 10^{-3}$$

$$\begin{aligned} o_D &= a + b \cdot V + c \cdot V^2 = 1,70 \cdot 10^{-3} + 3,30 \cdot 10^{-6} \cdot 16,43 + 1,80 \cdot 10^{-7} \cdot 16,43^2 \\ &= 1,80 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Přírůstek rychlosti se spočte dle vztahu (1.26):

$$\begin{aligned}\Delta v_i &= \frac{g}{(1 + \rho)} \cdot \frac{F_O - G_L \cdot o_L - G_D \cdot o_D - (G_L + G_D) \cdot o_T}{G_L + G_D} \cdot \Delta t_i \\ &= \frac{9,81}{(1 + 0,06)} \cdot \frac{209000 - 824040 \cdot 3,03 \cdot 10^{-3} - 2943000 \cdot 1,80 \cdot 10^{-3} - (824040 + 2943000) \cdot \frac{1,85}{1000}}{627840 + 2943000} \\ &\cdot 10 \cdot 3,6 = 17,18 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}\end{aligned}$$

Rychlost vlaku v tomto kroku bude stanovena dle vztahu (1.27):

$$v_2 = v_{2-1} + \Delta v_2 = 16,43 + 17,18 = 33,61 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$$

Přírůstek ujeté dráhy stanovíme ze vztahu (1.28):

$$\Delta l_2 = v_{s2} \cdot \Delta t_i = \frac{v_2 + v_{2-1}}{2} \cdot \Delta t_i = \frac{33,61 + 16,43}{2} \cdot \frac{1}{3,6} \cdot 10 = 69,49 \text{ m}$$

Celková ujetá dráha v 2. kroku se spočte dle vztahu (1.29):

$$l_2 = l_{2-1} + \Delta l_2 = 22,81 + 69,49 = 92,30 \text{ m}$$

Výpočet spotřeby elektrické energie v druhém kroku:

V tomto kroku uvažujeme spotřebu pouze pro trakční motory, které jsou zapojeny sérioparalelně. Trakční motory jsou čtyři.

Napětí dodávané jednomu trakčnímu motoru můžeme spočítat dle vztahu (1.41):

$$U_{1TM} = \frac{U_N}{p} = \frac{3000}{2} = 1500 \text{ V}$$

Z energetické charakteristiky byl zjištěn proud jednoho trakčního motoru $I_{TM} = 700 \text{ A}$. Následně pro zjištění spotřeby jednoho trakčního motoru v tomto kroku můžeme dle vzorce (1.42) psát:

$$E_{1TM} = U_{TM_i} \cdot I_{S1TM_i} \cdot \Delta t_i = 1500 \cdot 700 \cdot 10 = 10\,500\,000 \text{ W} \cdot \text{s}$$

Celková spotřeba trakčních motorů ve druhém kroku bude dle vzorce (1.43):

$$E_{TR} = E_{1TM} \cdot n_{TM} = 2,92 \cdot 4 = 11,67 \text{ kW} \cdot \text{h}$$

Ukázka tabulkového zpracování tachogramu řady 163 je zobrazena na obrázku níže.

i	Δt_i	OL	OD	V_{k-1}	ΔV_i	V_i	V_s	F_0	ΔI_i	I_i	Π_{TM}	s_f	U_{TM}	P_{TM}	E_{TM}
	[s]	[N]	[N]	[km·h ⁻¹]	[km·h ⁻¹]	[km·h ⁻¹]	[km·h ⁻¹]	N	[m]	[m]	[A]	[‰]	[V]	[W]	[W·s]
0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0
1	10	2,31E+03	5,00E+03	0,00	16,43	16,43	8,21	200000,00	22,81	22,81	700	1,85	1500	1050000	10500000
2	10	2,50E+03	5,31E+03	16,43	17,18	33,60	25,01	209000,00	69,49	92,30	700	1,85	1500	1050000	10500000
3	10	3,10E+03	5,93E+03	33,60	16,63	50,24	41,92	195000,00	116,45	208,75	700	-0,56	1500	1050000	10500000
4	10	4,08E+03	6,83E+03	50,24	15,23	65,47	57,85	181000,00	160,71	369,45	700	-0,56	1500	1050000	10500000
5	10	5,31E+03	7,91E+03	65,47	12,80	78,27	71,87	170500,00	199,64	569,09	700	3,33	1500	1050000	10500000
6	10	6,60E+03	9,01E+03	78,27	1,49	79,76	79,01	81000,00	219,49	788,58	400	12,89	1500	600000	6000000
7	10	6,76E+03	9,15E+03	79,76	0,24	80,00	79,88	63200,00	221,89	1010,47	400	11,83	1500	600000	6000000
8	10	6,79E+03	9,17E+03	80,00	0,00	80,00	80,00	66664,91	222,22	1232,69	400	13,46	1500	600000	6000000
9	10	6,79E+03	9,17E+03	80,00	0,00	80,00	80,00	66664,84	222,22	1454,91	400	13,46	1500	600000	6000000
10	10	6,79E+03	9,17E+03	80,00	0,00	80,00	80,00	62257,40	222,22	1677,13	400	12,29	1500	600000	6000000
11	10	6,79E+03	9,17E+03	80,00	0,00	80,00	80,00	64555,29	222,22	1899,36	400	12,90	1500	600000	6000000
12	10	6,79E+03	9,17E+03	80,00	0,00	80,00	80,00	98609,34	222,22	2121,58	650	21,94	1500	975000	9750000
13	10	6,79E+03	9,17E+03	80,00	0,00	80,00	80,00	93410,82	222,22	2343,80	600	20,56	1500	900000	9000000
14	10	6,79E+03	9,17E+03	80,00	0,00	80,00	80,00	93410,82	222,22	2566,02	600	20,56	1500	900000	9000000
15	10	6,79E+03	9,17E+03	80,00	0,00	80,00	80,00	97968,94	222,22	2788,24	650	21,77	1500	975000	9750000
16	10	6,79E+03	9,17E+03	80,00	0,00	80,00	80,00	97968,94	222,22	3010,47	650	21,77	1500	975000	9750000
17	10	6,79E+03	9,17E+03	80,00	0,00	80,00	80,00	94992,98	222,22	3232,69	650	20,98	1500	975000	9750000
18	10	6,79E+03	9,17E+03	80,00	0,00	80,00	80,00	94992,98	222,22	3454,91	650	20,98	1500	975000	9750000
19	10	6,79E+03	9,17E+03	80,00	0,00	80,00	80,00	95746,38	222,22	3677,13	650	21,18	1500	975000	9750000
20	10	6,79E+03	9,17E+03	80,00	0,00	80,00	80,00	97290,87	222,22	3899,36	650	21,59	1500	975000	9750000

Obrázek 2.11: Ukázka tabelárního zpracování tachogramu hnacího vozidla E499.3 na zadané trati

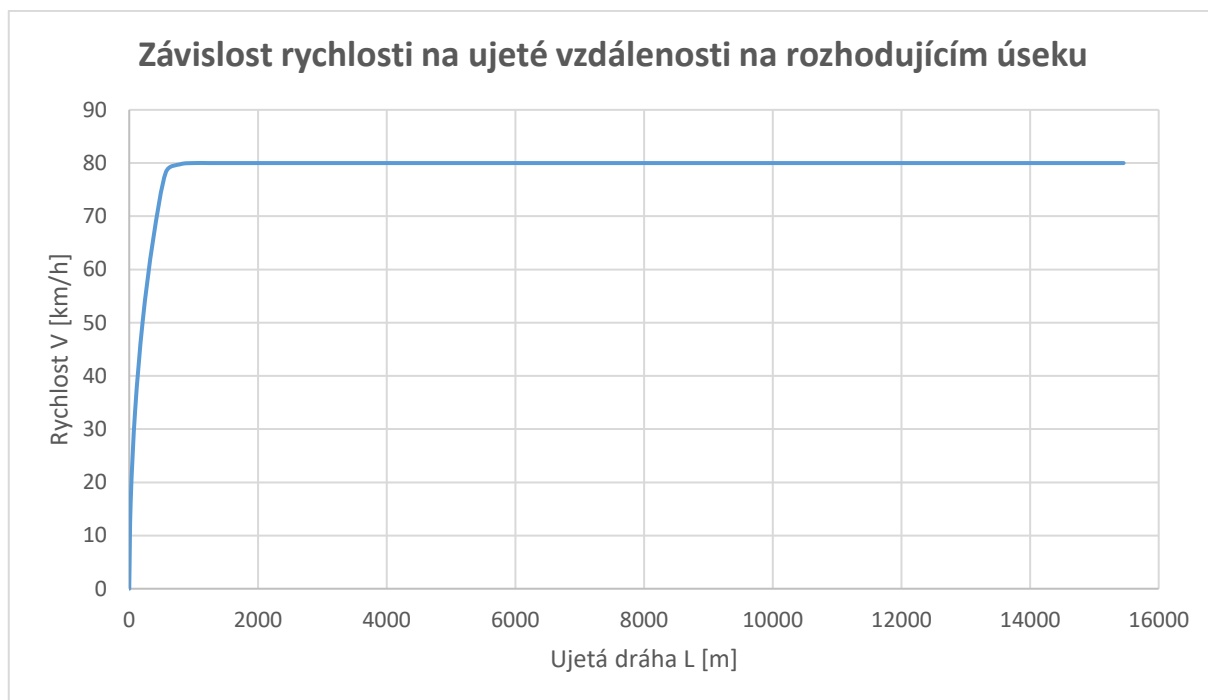
Vyhodnocení tachogramu:

V první fázi tachogramu mezi stanicemi Jeseník a Ramzová jede vlak jízdním režimem jízda silou, díky kterému dosáhne traťové rychlosti $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ po 1 010 ujetých metrech. Následně vlak jede jízdním režimem jízda konstantní rychlostí, aby byla udržována traťová rychlost.

Kompletně zpracovaný tachogram pro rozhodující úsek se nachází v příloze č. 2.

Výsledkem tachogramu je zjištěný čas jízdy vlaku ze stanice výchozí do stanice cílové, který činí **49,80** minut. Tato jízdní doba je pouze teoretická pro plynulou, nepřerušovanou jízdu vlaku při snaze dosáhnout maxima traťové rychlosti v celém průběhu jízdy.

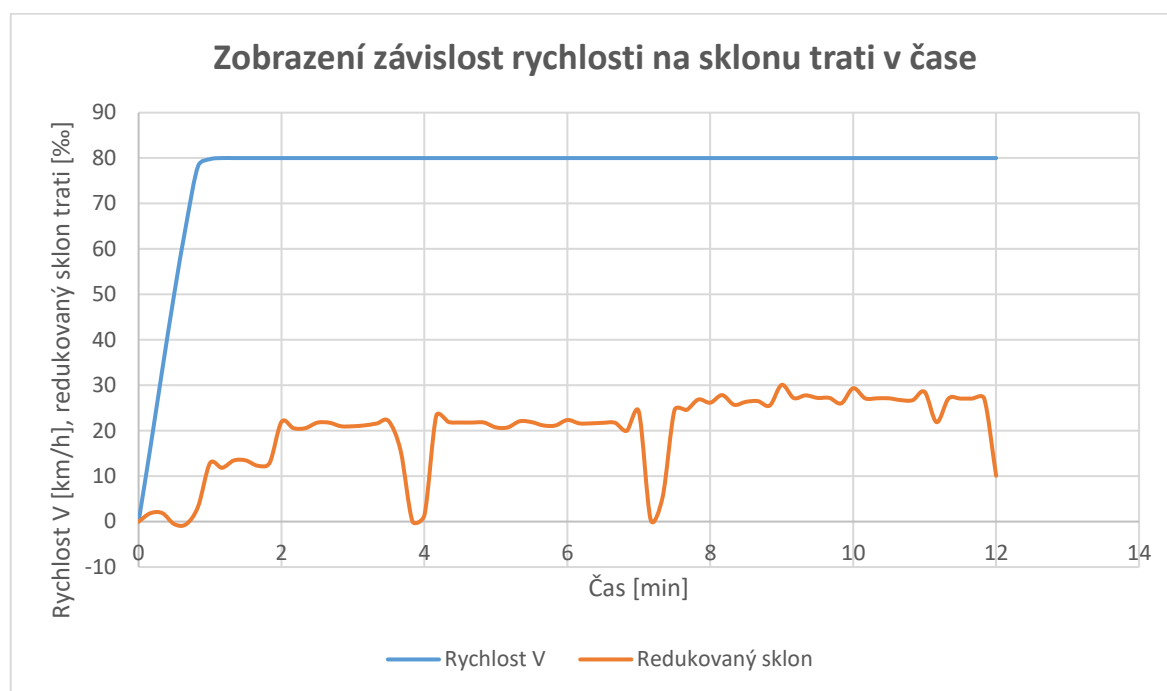
Dalším ukazatelem je vývoj rychlosti vlaku vzhledem k ujeté vzdálenosti na rozhodujícím úseku, kde se nachází největší souvislé stoupání. Vývoj rychlosti vzhledem k ujeté dráze je zobrazen v grafu níže.



Graf 2.3: Závislost rychlosti na ujeté vzdálenosti pro řadu 163

Z grafu je patrné, že vlak dosáhne traťové rychlosti již po velmi krátké ujeté vzdálenosti a je udržována po celou dobu stoupání. Není tedy ovlivněna velikostí stoupání a hnací vozidlo má dostatečný výkon po překonání tohoto úseku při plné traťové rychlosti.

Dalším zobrazením je závislost rychlosti na sklonu trati, který je vyjádřen pomocí redukovaného sklonu v čase. Tato závislost je zobrazena v grafu níže.



Graf 2.4: Závislost rychlosti na sklonu trati v čase pro řadu 163

Z grafu vyplývá, že průběh jízdy, tedy dosažení traťové rychlosti, není ovlivněn velikostí stoupání ve smyslu nechtěného snížení rychlosti na úseku.

2.4.4 Energetická náročnost hnacího vozidla řady 163

Energetická náročnost, v tomto případě spotřeba elektrické energie, byla určena přímo z tachogramu jízdy vozidla spočteného v oddíle 2.4.3. Vychází totiž z energetické charakteristiky vozidla.

Celkovou spotřebu energie spočteme dle vztahu (1.40):

$$E_C = E_{TR} + E_{PZ} + E_{NAP} + E_Z = 2\,196,83 + 0,0058 + 0 + 0 = 2\,196,84 \text{ kW} \cdot h$$

kde spotřeba trakčních motorů je součtem spotřeby všech kroků v tachogramu vynásobená počtem trakčních motorů, tedy čtyřmi. ($E_{TR} = 2\,196,83 \text{ kW} \cdot h$).

Energetická spotřeba pomocných zařízení se spočte dle vztahu (1.44):

$$E_{PZ} = \kappa \cdot E_{1TM} = 0,02 \cdot 0,29 = 0,0058 \text{ kW} \cdot h$$

Energetická spotřeba pro napájení tažených vozidel bude v tomto případě nulová, jelikož uvažujeme nákladní otevřené vysokostěnné vozy.

$$E_{NAP} = 0 \text{ kW} \cdot h$$

Stejně tak bude nulová složka energie na pokrytí ztrát, poněvadž předchozí složky již zahrnují ztrátovou složkou.

$$E_z = 0 \text{ kW} \cdot h$$

2.5 Provozně technické vyhodnocení

V této práci byly spočítány parametry pohybu vlaků nezávislé a závislé vozby, aby bylo možné je porovnat. Hnací vozidlem pro nezávislou vozbu byla určena lokomotiva řady 742.0, která je na trati v současné době používána. Hnací vozidlem pro vozbu závislou byla určena lokomotiva řady 163. Kritériem výběru byla snaha modernizace vozového parku pro nákladní dopravu na trati Jeseník – Zábřeh na Moravě.

Pro další výpočty byla provedena analýza trati. Ta spočívala v přečtení výkresů profilu trati a následného výpočtu jejího redukovaného sklonu, který byl použit pro další výpočty. Dalšími počítanými parametry byly rozhodné stoupání (27,2481 ‰) a rozhodný spád (29,2214 ‰).

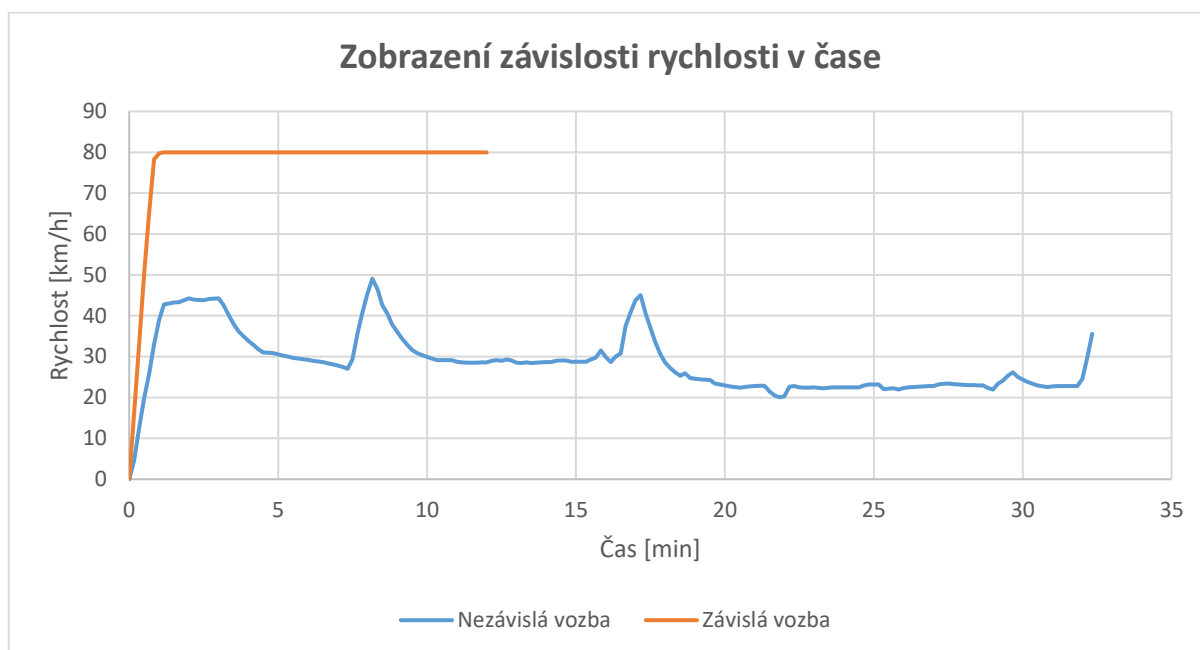
Dalším krokem bylo vypočtení normativů hmotnosti pro vybrané vozidlo závislé vozby na zadaném úseku. Normativ hmotnosti pro hnací vozidlo E499.3 byl stanoven $M = 423 \text{ t}$.

Hlavním cílem bylo sestavení tachogramů pro vybraná vozidla. Jejich kompletní rozbor se nachází v oddílech 2.4.1 a 2.4.3. Pro přehlednější porovnání se práce soustředila na úsek mezi Jeseníkem a Ramzovou, který je kvůli velkému převýšení nejnáročnějším úsekem trati. Průběh jízdy závislé a nezávislé vozby na tomto úseku je zobrazen v grafu 2.5.



Graf 2.5: Závislost rychlosti na ujeté vzdálenosti pro obě vozby

Grafické zobrazení průběhu jízdy vozeb v čase je zobrazeno na grafu 2.6.



Graf 2.6: Závislost rychlosti na čase pro obě vozby

Z grafů je patrné, že vozidlo nezávislé vozby není schopno na tomto úseku dosáhnout traťové rychlosti kvůli velikosti stoupání, kdežto vozidlo závislé vozby dosahuje traťové rychlosti již po pár minutách a je schopno tuto rychlost udržet na celém úseku.

V otázce energetické náročnosti je to poněkud složitější. Jelikož vozby používají jiné druhy energie, je velice složité je mezi sebou porovnat. Proto je v tomto případě použit přepočítaný spotřebovaná energie na peněžní jednotky. Celková spotřeba energie je ovlivněna především hmotností tažených vozidel. Pro porovnání vezou obě lokomotivy tažená vozidla o hmotnosti 300 t. Nezávislá vozba, v tomto případě vozidlo na motorovou naftu, spotřebuje na úseku z Jeseníku do Zábřehu na Moravě (65 km) 218,35 l motorové nafty. Dle serveru kurzy.cz je spotřebitelská cena za litr nafty ke dni 26. 4. 2019 32,09 Kč. Při takové ceně stojí jedna jízda zhruba 7 000 Kč. Závislá vozba za stejných podmínek spotřebuje 2 196,84 kWh. Dle serveru kurzy.cz je cena energie ke stejnému dni 1,33 Kč za 1 kWh. Celková cena této jízdy tedy činí přibližně 3 000 Kč. To znamená, že použití vozidla elektrické trakce je při každé jízdě téměř dva a půl krát levnější než použití vozidla s naftovým pohonem.

Vzhledem k délce trati a náročnosti terénu by byla případná elektrifikace trati velmi nákladná, a navíc by svým vzhledem uškodila rázu krajiny, která se částečně nachází v chráněné krajinné oblasti Jeseníky. Nicméně provoz by byl ekologičtější a elektrickou energií by bylo možné získávat z větrné elektrárny, která se nachází v Ostružné, což je zhruba v jedné třetině trati.

Seznam použité literatury

- [1] ŠIROKÝ, Jaromír. *Mechanika v dopravě I: kolejová vozidla*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2004. ISBN 80-248-0536-7.
- [2] ANTONICKÝ, Stanislav. *Mechanika vlakové dopravy*. Bratislava: Alfa, 1984. Učební texty vysokých škol. ISBN 63-718-84.
- [3] DRÁBEK, Jiří. *Dynamika a energetika elektrické trakce*. Bratislava: Alfa, 1981. Dočasná vysokoškolská učebnica (Alfa). ISBN 63-749-81.
- [4] HERZÁŇ, František, Jan MRKVIČKA a Dušan HABARDA. *Mechanika dopravy koľajových vozidiel*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1989. ISBN 31-049-89.
- [5] ČÁP, Ladislav, Ladislav FREIBAUER a Vladimír HLAVŇA. *Teorie vozidel*. 2.vyd. Žilina: Vysoká škola dopravy a spojov, 1991. ISBN 80-7100-047-7.
- [6] ANTONICKÝ, Stanislav, Pavel JANOTKA a František HERZÁŇ. *Provoz železničních hnacích vozidel*. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1984. ISBN 31-033-84.
- [7] ŠIROKÝ, Jaromír. *Mechanika v dopravě II: příklady*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1252-5.

Normy:

- [8] ČSD V7 Trakční výpočty. Platí od 01. 06. 1982, změna 01. 01 1989. Praha: GŘ ČSD, 1982.

Internetové zdroje

- [9] 742 | T 466.2. *AtlasLokomotiv.net* [online]. Spolek ŽelPage, 2019 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-742.html#udaje>.
- [10] VYSKOČIL, Václav. LOKOMOTIVY ŘADY 742 (EX T 466.2). *VLAKY.NET* [online]. 13.10.2009 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/003232-Lokomotivy-rady-742-T-4662.asp>.
- [11] 163, 162 | E 499.3. *AtlasLokomotiv.net* [online]. Spolek ŽelPage, 2019 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <http://www.atlaslokomotiv.net/loko-163.html>.
- [12] GARGULA, Josef. *163.003 ČD* [online]. In: 7.2.2006 [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <https://www.vlaky.net/galerie/7/163/#lg=1&slide=4>.
- [13] T 466.2 742 [online]. In: Široký [cit. 2019-04-21]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~s1i95/mvd/t_ch/T4662.gif.

Přílohy

Příloha č. 1: Tachogram jízdy hnacího vozidla řady 742.0 na porovnávacím úseku trati Jeseník – Zábřeh na Moravě

i	Δt_i	O_L	O_D	V_{i-1}	ΔV_i	V_i	V_s	F_o	Δl_i	l_i	s_r	RS	Q spotřeba
	[s]	[N]	[N]	[km·h ⁻¹]	[km·h ⁻¹]	[km·h ⁻¹]	[km·h ⁻¹]	N	[m]	[m]	[‰]		[l]
0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,0000	0	0,0000
1	10,0	1757,95	5003,10	0,00	4,72	4,72	2,36	64000	6,56	6,56	1,8501	3	0,2083
2	10,0	1769,86	5060,80	4,72	8,03	12,75	8,74	99500	24,28	30,84	1,8501	4	0,3194
3	10,0	1844,76	5213,14	12,75	7,08	19,83	16,29	89500	45,26	76,09	1,8501	5	0,3750
4	10,0	1967,80	5403,99	19,83	6,11	25,94	22,89	79500	63,57	139,67	1,8501	6	0,4778
5	10,0	2117,13	5611,60	25,94	7,02	32,97	29,45	81000	81,82	221,48	-0,5600	7	0,5972
6	10,0	2337,92	5898,97	32,97	6,04	39,01	35,99	71000	99,97	321,45	-0,5600	8	0,6944
7	10,0	2570,02	6188,04	39,01	3,76	42,77	40,89	61000	113,59	435,04	3,3300	8	0,6944
8	10,0	2734,33	6387,72	42,77	0,27	43,04	42,91	58000	119,18	554,22	12,8900	8	0,6944
9	10,0	2746,51	6402,38	43,04	0,17	43,21	43,12	57000	119,79	674,01	12,8900	8	0,6944
10	10,0	2754,34	6411,81	43,21	0,14	43,35	43,28	56700	120,22	794,23	12,8900	8	0,6944
11	10,0	2760,83	6419,61	43,35	0,47	43,82	43,59	56500	121,07	915,31	11,8300	8	0,6944
12	10,0	2782,86	6446,09	43,82	0,42	44,25	44,03	56000	122,32	1037,63	11,8300	8	0,6944
13	10,0	2802,72	6469,90	44,25	-0,26	43,98	44,11	54500	122,54	1160,17	13,4600	8	0,6944
14	10,0	2790,26	6454,96	43,98	-0,08	43,90	43,94	56450	122,06	1282,23	13,4600	8	0,6944
15	10,0	2786,50	6450,45	43,90	-0,08	43,82	43,86	56470	121,84	1404,07	13,4600	8	0,6944
16	10,0	2782,88	6446,10	43,82	0,32	44,14	43,98	56500	122,17	1526,24	12,2900	8	0,6944
17	10,0	2797,70	6463,89	44,14	0,07	44,21	44,18	56100	122,71	1648,95	12,9000	8	0,6944
18	10,0	2801,11	6467,97	44,21	0,06	44,27	44,24	56000	122,90	1771,85	12,9000	8	0,6944

19	10,0	2804,05	6471,49	44,27	-1,65	42,63	43,45	56000	120,70	1892,54	18,0300	8	0,6944
20	10,0	2727,64	6379,65	42,63	-2,47	40,16	41,39	61000	114,98	2007,52	21,9400	8	0,6944
21	10,0	2618,61	6247,45	40,16	-2,08	38,08	39,12	60000	108,66	2116,19	20,5600	8	0,6944
22	10,0	2531,80	6141,09	38,08	-1,87	36,21	37,14	62000	103,17	2219,36	20,5600	8	0,6944
23	10,0	2457,50	6049,12	36,21	-1,21	35,00	35,60	69000	98,90	2318,26	20,5600	8	0,6944
24	10,0	2411,68	5991,93	35,00	-1,15	33,85	34,42	69500	95,62	2413,88	20,5600	8	0,6944
25	10,0	2369,44	5938,84	33,85	-0,95	32,90	33,37	71500	92,70	2506,59	20,5600	8	0,6944
26	10,0	2335,46	5895,85	32,90	-1,12	31,78	32,34	74000	89,83	2596,41	21,7700	8	0,6944
27	10,0	2296,92	5846,74	31,78	-0,78	31,00	31,39	77500	87,19	2683,60	21,7700	8	0,6944
28	10,0	2270,72	5813,14	31,00	-0,08	30,91	30,96	79000	85,99	2769,59	20,1100	8	0,6944
29	10,0	2267,97	5809,60	30,91	-0,06	30,85	30,88	79200	85,78	2855,38	20,1100	8	0,6944
30	10,0	2265,85	5806,88	30,85	-0,29	30,56	30,70	79800	85,29	2940,66	20,9700	8	0,6944
31	10,0	2256,21	5794,45	30,56	-0,28	30,28	30,42	79950	84,49	3025,15	20,9700	8	0,6944
32	10,0	2247,18	5782,79	30,28	-0,27	30,00	30,14	80000	83,72	3108,87	20,9800	8	0,6944
33	10,0	2238,34	5771,34	30,00	-0,27	29,73	29,87	80000	82,96	3191,84	20,9800	8	0,6944
34	10,0	2229,64	5760,05	29,73	-0,18	29,55	29,64	81000	82,34	3274,17	20,9800	8	0,6944
35	10,0	2224,01	5752,74	29,55	-0,16	29,39	29,47	81200	81,87	3356,04	20,9800	8	0,6944
36	10,0	2219,04	5746,27	29,39	-0,21	29,18	29,29	81350	81,36	3437,40	21,1800	8	0,6944
37	10,0	2212,49	5737,73	29,18	-0,20	28,99	29,09	81450	80,79	3518,19	21,1800	8	0,6944
38	10,0	2206,32	5729,68	28,99	-0,17	28,81	28,90	81700	80,27	3598,47	21,1800	8	0,6944
39	10,0	2200,95	5722,65	28,81	-0,16	28,65	28,73	81800	79,80	3678,27	21,1800	8	0,6944
40	10,0	2195,93	5716,08	28,65	-0,28	28,37	28,51	82000	79,19	3757,46	21,5900	8	0,6944
41	10,0	2187,40	5704,89	28,37	-0,22	28,14	28,26	82600	78,49	3835,95	21,5900	8	0,6944
42	10,0	2180,68	5696,06	28,14	-0,35	27,79	27,97	83000	77,69	3913,64	22,1000	8	0,6944
43	10,0	2170,12	5682,14	27,79	-0,30	27,49	27,64	83500	76,77	3990,41	22,1000	8	0,6944
44	10,0	2161,12	5670,25	27,49	-0,47	27,02	27,25	87000	75,70	4066,11	23,5700	8	0,6944
45	10,0	2147,56	5652,26	27,02	2,38	29,40	28,21	89000	78,36	4144,47	15,6000	8	0,6944

46	10,0	2219,18	5746,46	29,40	6,40	35,80	32,60	83000	90,55	4235,02	1,8000	8	0,6944
47	10,0	2441,91	6029,71	35,80	4,99	40,79	38,30	69000	106,38	4341,40	1,9700	8	0,6944
48	10,0	2645,91	6280,69	40,79	4,72	45,51	43,15	59500	119,86	4461,26	0,0000	8	0,6944
49	10,0	2863,23	6542,24	45,51	3,54	49,05	47,28	52500	131,34	4592,60	1,4300	8	0,6944
50	10,0	3042,10	6754,22	49,05	-2,52	46,54	47,80	49000	132,77	4725,37	18,5300	8	0,6944
51	10,0	2913,76	6602,38	46,54	-3,91	42,63	44,58	51000	123,84	4849,21	23,3500	8	0,6944
52	10,0	2727,75	6379,78	42,63	-2,11	40,51	41,57	56000	115,48	4964,69	19,4800	8	0,6944
53	10,0	2633,91	6266,09	40,51	-2,68	37,83	39,17	58500	108,81	5073,50	21,9400	8	0,6944
54	10,0	2521,78	6128,73	37,83	-1,82	36,01	36,92	67000	102,56	5176,07	21,8000	8	0,6944
55	10,0	2450,10	6039,91	36,01	-1,62	34,40	35,20	69000	97,79	5273,86	21,8000	8	0,6944
56	10,0	2389,32	5963,88	34,40	-1,51	32,88	33,64	70000	93,45	5367,30	21,8000	8	0,6944
57	10,0	2335,06	5895,34	32,88	-1,22	31,66	32,27	73000	89,65	5456,95	21,8000	8	0,6944
58	10,0	2293,04	5841,78	31,66	-0,79	30,87	31,27	77500	86,86	5543,81	21,8000	8	0,6944
59	10,0	2266,63	5807,89	30,87	-0,51	30,37	30,62	80500	85,06	5628,87	21,8000	8	0,6944
60	10,0	2250,11	5786,57	30,37	-0,46	29,91	30,14	81000	83,72	5712,60	21,8000	8	0,6944
61	10,0	2235,46	5767,61	29,91	-0,41	29,51	29,71	81500	82,53	5795,12	21,8000	8	0,6944
62	10,0	2222,60	5750,90	29,51	-0,36	29,15	29,33	82000	81,47	5876,59	21,8000	8	0,6944
63	10,0	2211,45	5736,37	29,15	0,02	29,17	29,16	82200	81,00	5957,60	20,7300	8	0,6944
64	10,0	2212,11	5737,24	29,17	0,00	29,17	29,17	82000	81,04	6038,63	20,7300	8	0,6944
65	10,0	2212,19	5737,34	29,17	0,00	29,18	29,18	82000	81,04	6119,68	20,7300	8	0,6944
66	10,0	2212,27	5737,44	29,18	-0,45	28,73	28,95	82000	80,43	6200,11	22,0800	8	0,6944
67	10,0	2198,45	5719,38	28,73	-0,16	28,57	28,65	85000	79,58	6279,68	22,0800	8	0,6944
68	10,0	2193,42	5712,79	28,57	-0,07	28,50	28,53	86000	79,25	6358,94	22,0800	8	0,6944
69	10,0	2191,29	5710,00	28,50	0,04	28,54	28,52	86500	79,21	6438,15	21,8900	8	0,6944
70	10,0	2192,52	5711,61	28,54	0,01	28,55	28,54	86200	79,28	6517,43	21,8900	8	0,6944
71	10,0	2192,89	5712,09	28,55	0,01	28,56	28,55	86200	79,32	6596,75	21,8900	8	0,6944
72	10,0	2193,25	5712,58	28,56	0,01	28,57	28,57	86200	79,35	6676,10	21,8900	8	0,6944

73	10,0	2193,62	5713,06	28,57	0,44	29,01	28,79	86150	79,98	6756,08	20,5900	8	0,6944
74	10,0	2207,15	5730,77	29,01	0,14	29,16	29,08	83000	80,79	6836,87	20,5900	8	0,6944
75	10,0	2211,61	5736,58	29,16	-0,14	29,02	29,09	82000	80,80	6917,66	21,1500	8	0,6944
76	10,0	2207,35	5731,02	29,02	0,25	29,27	29,14	86150	80,96	6998,62	21,1500	8	0,6944
77	10,0	2215,15	5741,20	29,27	-0,18	29,08	29,18	81500	81,05	7079,67	21,1500	8	0,6944
78	10,0	2209,40	5733,70	29,08	-0,54	28,55	28,81	82000	80,04	7159,71	22,3600	8	0,6944
79	10,0	2192,79	5711,97	28,55	-0,12	28,43	28,49	86500	79,13	7238,84	22,3600	8	0,6944
80	10,0	2189,25	5707,32	28,43	0,13	28,56	28,49	86500	79,15	7317,99	21,6200	8	0,6944
81	10,0	2193,23	5712,54	28,56	-0,15	28,41	28,48	83500	79,12	7397,11	21,6200	8	0,6944
82	10,0	2188,67	5706,56	28,41	0,08	28,49	28,45	86000	79,03	7476,15	21,6200	8	0,6944
83	10,0	2191,23	5709,92	28,49	0,08	28,58	28,54	86000	79,27	7555,41	21,6200	8	0,6944
84	10,0	2193,78	5713,26	28,58	0,08	28,66	28,62	86000	79,50	7634,91	21,6200	8	0,6944
85	10,0	2196,32	5716,59	28,66	0,04	28,70	28,68	85500	79,66	7714,57	21,6200	8	0,6944
86	10,0	2197,42	5718,03	28,70	0,32	29,01	28,85	85000	80,15	7794,72	20,6400	8	0,6944
87	10,0	2207,14	5730,74	29,01	0,03	29,05	29,03	82000	80,64	7875,36	20,6400	8	0,6944
88	10,0	2208,18	5732,10	29,05	0,03	29,08	29,06	82000	80,73	7956,08	20,6400	8	0,6944
89	10,0	2209,21	5733,45	29,08	-0,33	28,75	28,91	82000	80,31	8036,40	21,7400	8	0,6944
90	10,0	2198,93	5720,01	28,75	0,00	28,74	28,74	85500	79,84	8116,24	21,7400	8	0,6944
91	10,0	2198,79	5719,82	28,74	0,00	28,74	28,74	85500	79,83	8196,07	21,7400	8	0,6944
92	10,0	2198,65	5719,64	28,74	0,00	28,73	28,73	85500	79,82	8275,89	21,7400	8	0,6944
93	10,0	2198,51	5719,46	28,73	0,58	29,31	29,02	85500	80,61	8356,50	19,9900	8	0,6944
94	10,0	2216,43	5742,87	29,31	0,43	29,75	29,53	84000	82,02	8438,52	19,9900	8	0,6944
95	10,0	2230,13	5760,69	29,75	1,73	31,47	30,61	83000	85,03	8523,55	15,8200	8	0,6944
96	10,0	2286,58	5833,50	31,47	-1,54	29,94	30,71	78000	85,29	8608,84	24,1800	8	0,6944
97	10,0	2236,24	5768,62	29,94	-1,25	28,69	29,31	81000	81,43	8690,27	24,1800	8	0,6944
98	10,0	2197,27	5717,84	28,69	1,34	30,03	29,36	86000	81,55	8771,82	17,8600	8	0,6944
99	10,0	2239,11	5772,34	30,03	0,77	30,79	30,41	80000	84,47	8856,30	17,8600	8	0,6944

100	10,0	2263,98	5804,47	30,79	6,67	37,47	34,13	81000	94,81	8951,10	0,3900	8	0,6944
101	10,0	2507,14	6110,66	37,47	3,43	40,90	39,19	64000	108,85	9059,95	5,2000	8	0,6944
102	10,0	2650,79	6286,62	40,90	2,87	43,77	42,34	59000	117,60	9177,56	5,4100	8	0,6944
103	10,0	2780,42	6443,15	43,77	1,24	45,01	44,39	53000	123,31	9300,86	8,5400	8	0,6944
104	10,0	2839,13	6513,47	45,01	-4,25	40,76	42,89	51500	119,13	9419,99	24,5600	8	0,6944
105	10,0	2644,59	6279,08	40,76	-3,81	36,95	38,86	64000	107,93	9527,92	26,8600	8	0,6944
106	10,0	2486,57	6085,22	36,95	-3,40	33,55	35,25	68000	97,91	9625,83	26,8600	8	0,6944
107	10,0	2358,51	5925,04	33,55	-3,00	30,54	32,04	72000	89,01	9714,85	26,8600	8	0,6944
108	10,0	2255,77	5793,88	30,54	-2,01	28,54	29,54	80000	82,05	9796,90	26,1700	8	0,6944
109	10,0	2192,52	5711,62	28,54	-1,34	27,20	27,87	87000	77,41	9874,31	26,1700	8	0,6944
110	10,0	2152,69	5659,07	27,20	-1,05	26,15	26,67	90000	74,09	9948,39	26,1700	8	0,6944
111	10,0	2122,78	5619,18	26,15	-0,86	25,29	25,72	92000	71,44	10019,83	26,1700	8	0,6944
112	10,0	2099,25	5587,49	25,29	0,66	25,95	25,62	95000	71,16	10090,99	22,4800	8	0,6944
113	10,0	2117,21	5611,70	25,95	-1,22	24,72	25,33	94000	70,37	10161,36	27,8300	8	0,6944
114	10,0	2084,14	5567,00	24,72	-0,14	24,59	24,66	98000	68,49	10229,85	25,7100	8	0,6944
115	10,0	2080,56	5562,13	24,59	-0,11	24,48	24,53	98300	68,15	10298,00	25,7100	8	0,6944
116	10,0	2077,76	5558,30	24,48	-0,09	24,39	24,44	98500	67,88	10365,88	25,7100	8	0,6944
117	10,0	2075,46	5555,17	24,39	-0,08	24,31	24,35	98600	67,65	10433,52	25,7100	8	0,6944
118	10,0	2073,43	5552,40	24,31	-0,90	23,42	23,86	98800	66,29	10499,81	28,2300	8	0,6944
119	10,0	2050,55	5520,95	23,42	-0,23	23,18	23,30	99200	64,72	10564,53	26,3600	8	0,6944
120	10,0	2044,75	5512,93	23,18	-0,20	22,98	23,08	99500	64,11	10628,64	26,3600	8	0,6944
121	10,0	2039,73	5505,97	22,98	-0,23	22,74	22,86	99700	63,50	10692,15	26,5100	8	0,6944
122	10,0	2034,02	5498,02	22,74	-0,20	22,54	22,64	100000	62,89	10755,04	26,5100	8	0,6944
123	10,0	2029,07	5491,12	22,54	-0,16	22,38	22,46	100500	62,39	10817,43	26,5100	8	0,6944
124	10,0	2025,30	5485,86	22,38	0,21	22,59	22,49	101000	62,46	10879,89	25,5600	8	0,6944
125	10,0	2030,27	5492,80	22,59	0,11	22,70	22,65	100000	62,90	10942,80	25,5600	8	0,6944
126	10,0	2032,99	5496,59	22,70	0,07	22,78	22,74	99600	63,16	11005,96	25,5600	8	0,6944

127	10,0	2034,80	5499,12	22,78	0,07	22,85	22,81	99600	63,37	11069,33	25,5600	8	0,6944
128	10,0	2036,61	5501,63	22,85	0,06	22,91	22,88	99400	63,55	11132,88	25,5600	8	0,6944
129	10,0	2037,95	5503,50	22,91	-1,47	21,43	22,17	99200	61,58	11194,47	30,0900	8	0,6944
130	10,0	2003,10	5454,60	21,43	-0,92	20,51	20,97	105000	58,25	11252,72	30,0900	8	0,6944
131	10,0	1982,41	5425,09	20,51	-0,45	20,06	20,28	110000	56,34	11309,06	30,0900	8	0,6944
132	10,0	1972,61	5410,96	20,06	0,20	20,26	20,16	117000	55,99	11365,05	30,0900	8	0,6944
133	10,0	1976,97	5417,25	20,26	2,42	22,68	21,47	115000	59,63	11424,68	22,8700	8	0,6944
134	10,0	2032,42	5495,81	22,68	0,09	22,76	22,72	102000	63,11	11487,80	26,2000	8	0,6944
135	10,0	2034,50	5498,69	22,76	-0,29	22,47	22,62	101500	62,82	11550,62	27,2000	8	0,6944
136	10,0	2027,38	5488,76	22,47	-0,06	22,41	22,44	104000	62,33	11612,95	27,2000	8	0,6944
137	10,0	2025,94	5486,76	22,41	0,03	22,44	22,43	105000	62,29	11675,25	27,2000	8	0,6944
138	10,0	2026,75	5487,88	22,44	0,03	22,48	22,46	105000	62,39	11737,64	27,2000	8	0,6944
139	10,0	2027,55	5489,00	22,48	-0,16	22,32	22,40	105000	62,22	11799,85	27,7700	8	0,6944
140	10,0	2023,81	5483,76	22,32	-0,06	22,26	22,29	106000	61,91	11861,76	27,7700	8	0,6944
141	10,0	2022,32	5481,68	22,26	0,17	22,42	22,34	106500	62,06	11923,82	27,2200	8	0,6944
142	10,0	2026,32	5487,28	22,42	0,03	22,45	22,44	105000	62,33	11986,15	27,2200	8	0,6944
143	10,0	2026,96	5488,18	22,45	0,03	22,48	22,47	105000	62,40	12048,55	27,2200	8	0,6944
144	10,0	2027,60	5489,08	22,48	0,03	22,51	22,49	105000	62,48	12111,03	27,2200	8	0,6944
145	10,0	2028,24	5489,97	22,51	-0,02	22,48	22,49	104500	62,49	12173,52	27,2200	8	0,6944
146	10,0	2027,76	5489,29	22,48	0,03	22,51	22,50	105000	62,49	12236,01	27,2200	8	0,6944
147	10,0	2028,39	5490,18	22,51	-0,02	22,49	22,50	104500	62,50	12298,52	27,2200	8	0,6944
148	10,0	2027,91	5489,50	22,49	0,43	22,92	22,70	105000	63,07	12361,58	26,0200	8	0,6944
149	10,0	2038,24	5503,90	22,92	0,24	23,15	23,04	103000	63,99	12425,57	26,0200	8	0,6944
150	10,0	2044,08	5512,00	23,15	0,00	23,16	23,16	100500	64,32	12489,90	26,0200	8	0,6944
151	10,0	2044,15	5512,10	23,16	0,00	23,16	23,16	100500	64,33	12554,23	26,0200	8	0,6944
152	10,0	2044,22	5512,20	23,16	-1,11	22,05	22,61	100500	62,80	12617,03	29,3500	8	0,6944
153	10,0	2017,52	5474,94	22,05	0,11	22,17	22,11	102000	61,42	12678,44	26,1300	8	0,6944

154	10,0	2020,16	5478,66	22,17	0,06	22,23	22,20	101500	61,66	12740,11	26,1300	8	0,6944
155	10,0	2021,70	5480,81	22,23	-0,27	21,96	22,10	101500	61,38	12801,49	27,1300	8	0,6944
156	10,0	2015,36	5471,91	21,96	0,34	22,30	22,13	108000	61,48	12862,96	27,1300	8	0,6944
157	10,0	2023,38	5483,16	22,30	0,15	22,45	22,38	106000	62,16	12925,12	27,1300	8	0,6944
158	10,0	2026,98	5488,20	22,45	0,10	22,56	22,50	105500	62,51	12987,63	27,1300	8	0,6944
159	10,0	2029,46	5491,67	22,56	0,10	22,66	22,61	105500	62,80	13050,43	27,1300	8	0,6944
160	10,0	2031,94	5495,13	22,66	0,06	22,71	22,69	105000	63,02	13113,45	27,1300	8	0,6944
161	10,0	2033,29	5497,01	22,71	0,06	22,77	22,74	105000	63,17	13176,62	27,1300	8	0,6944
162	10,0	2034,63	5498,88	22,77	0,06	22,82	22,80	105000	63,33	13239,95	27,1300	8	0,6944
163	10,0	2035,97	5500,74	22,82	0,36	23,19	23,01	104500	63,91	13303,85	26,0600	8	0,6944
164	10,0	2044,92	5513,17	23,19	0,13	23,32	23,25	102000	64,59	13368,45	26,0600	8	0,6944
165	10,0	2048,13	5517,61	23,32	0,08	23,40	23,36	101500	64,89	13433,33	26,0600	8	0,6944
166	10,0	2050,17	5520,43	23,40	-0,14	23,26	23,33	101500	64,80	13498,14	26,7300	8	0,6944
167	10,0	2046,64	5515,55	23,26	-0,09	23,16	23,21	102000	64,48	13562,61	26,7300	8	0,6944
168	10,0	2044,31	5512,32	23,16	-0,08	23,09	23,13	102200	64,24	13626,86	26,7300	8	0,6944
169	10,0	2042,45	5509,75	23,09	-0,06	23,03	23,06	102400	64,06	13690,91	26,7300	8	0,6944
170	10,0	2041,07	5507,84	23,03	-0,04	23,00	23,01	102600	63,93	13754,84	26,7300	8	0,6944
171	10,0	2040,16	5506,57	23,00	-0,04	22,96	22,98	102600	63,83	13818,67	26,7300	8	0,6944
172	10,0	2039,26	5505,31	22,96	-0,02	22,94	22,95	102800	63,75	13882,42	26,7300	8	0,6944
173	10,0	2038,82	5504,70	22,94	-0,62	22,32	22,63	102800	62,87	13945,29	28,5300	8	0,6944
174	10,0	2023,90	5483,89	22,32	-0,41	21,91	22,12	105000	61,44	14006,73	28,5300	8	0,6944
175	10,0	2014,24	5470,34	21,91	1,45	23,36	22,64	107000	62,89	14069,62	23,5200	8	0,6944
176	10,0	2049,25	5519,16	23,36	0,79	24,15	23,76	100000	65,99	14135,61	23,5200	8	0,6944
177	10,0	2069,23	5546,65	24,15	1,14	25,29	24,72	98000	68,67	14204,28	21,8900	8	0,6944
178	10,0	2099,31	5587,58	25,29	0,85	26,14	25,72	95000	71,44	14275,72	21,8900	8	0,6944
179	10,0	2122,74	5619,12	26,14	-1,06	25,08	25,61	93000	71,15	14346,87	27,0700	8	0,6944
180	10,0	2093,65	5579,91	25,08	-0,68	24,40	24,74	97000	68,72	14415,58	27,0700	8	0,6944

181	10,0	2075,58	5555,33	24,40	-0,59	23,81	24,10	98000	66,95	14482,54	27,0700	8	0,6944
182	10,0	2060,47	5534,63	23,81	-0,49	23,32	23,56	99000	65,46	14547,99	27,0700	8	0,6944
183	10,0	2048,13	5517,62	23,32	-0,39	22,92	23,12	100000	64,23	14612,22	27,0700	8	0,6944
184	10,0	2038,40	5504,12	22,92	-0,21	22,72	22,82	102000	63,39	14675,61	27,0700	8	0,6944
185	10,0	2033,39	5497,15	22,72	-0,16	22,56	22,64	102500	62,89	14738,50	27,0700	8	0,6944
186	10,0	2029,57	5491,82	22,56	0,17	22,73	22,65	106000	62,90	14801,40	27,0700	8	0,6944
187	10,0	2033,66	5497,53	22,73	0,08	22,80	22,77	105000	63,24	14864,64	27,0700	8	0,6944
188	10,0	2035,49	5500,08	22,80	0,03	22,83	22,82	104500	63,39	14928,03	27,0700	8	0,6944
189	10,0	2036,18	5501,03	22,83	-0,02	22,81	22,82	104000	63,40	14991,43	27,0700	8	0,6944
190	10,0	2035,72	5500,40	22,81	0,00	22,82	22,82	104250	63,38	15054,81	27,0700	8	0,6944
191	10,0	2035,84	5500,56	22,82	0,00	22,82	22,82	104250	63,39	15118,20	27,0700	8	0,6944
192	10,0	2035,96	5500,72	22,82	1,68	24,51	23,67	104250	65,74	15183,94	22,0300	8	0,6944
193	10,0	2078,49	5559,30	24,51	5,07	29,58	27,04	98000	75,12	15259,06	10,0800	8	0,6944
194	10,0	2224,91	5753,91	29,58	5,97	35,55	32,57	82000	90,46	15349,52	2,8100	8	0,6944

Příloha č. 2: Tachogram jízdy hnacího vozidla řady 163 na porovnávacím úseku trati Jeseník – Zábřeh na Moravě

i	Δt_i	O_L	O_D	V_{i-1}	ΔV_i	V_i	V_s	F_o	Δl_i	l_i	I_{1TM}	s_r	U_{1TM}	P_{1TM}	E_{1TM}
	[s]	[N]	[N]	[km·h ⁻¹]	[km·h ⁻¹]	[km·h ⁻¹]	[km·h ⁻¹]	N	[m]	[m]	[A]	[‰]	[V]	[W]	[Ws]
0	0,0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0	0,00	0	0	0
1	10,0	2307,31	5003,10	0,00	16,43	16,43	8,21	200000	22,81	22,81	700	1,85	1500	1E+06	1,1E+07
2	10,0	2496,29	5305,55	16,43	17,18	33,60	25,01	209000	69,49	92,30	700	1,85	1500	1E+06	1,1E+07
3	10,0	3098,26	5927,66	33,60	16,63	50,24	41,92	195000	116,45	208,75	700	-0,56	1500	1E+06	1,1E+07
4	10,0	4075,16	6828,04	50,24	15,23	65,47	57,85	181000	160,71	369,45	700	-0,56	1500	1E+06	1,1E+07
5	10,0	5309,53	7909,52	65,47	12,80	78,27	71,87	170500	199,64	569,09	700	3,33	1500	1E+06	1,1E+07
6	10,0	6598,34	9008,57	78,27	1,49	79,76	79,01	81000	219,49	788,58	400	12,89	1500	600000	6000000
7	10,0	6763,16	9147,68	79,76	0,24	80,00	79,88	63200	221,89	1010,47	400	11,83	1500	600000	6000000
8	10,0	6790,13	9170,42	80,00	0,00	80,00	80,00	66665	222,22	1232,69	400	13,46	1500	600000	6000000
9	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	66665	222,22	1454,91	400	13,46	1500	600000	6000000
10	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	62257	222,22	1677,13	400	12,29	1500	600000	6000000
11	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	64555	222,22	1899,36	400	12,90	1500	600000	6000000
12	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	98609	222,22	2121,58	650	21,94	1500	975000	9750000
13	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	93411	222,22	2343,80	600	20,56	1500	900000	9000000
14	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	93411	222,22	2566,02	600	20,56	1500	900000	9000000
15	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	97969	222,22	2788,24	650	21,77	1500	975000	9750000
16	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	97969	222,22	3010,47	650	21,77	1500	975000	9750000
17	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	94993	222,22	3232,69	650	20,98	1500	975000	9750000
18	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	94993	222,22	3454,91	650	20,98	1500	975000	9750000
19	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	95746	222,22	3677,13	650	21,18	1500	975000	9750000
20	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	97291	222,22	3899,36	650	21,59	1500	975000	9750000
21	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	99212	222,22	4121,58	650	22,10	1500	975000	9750000
22	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	74726	222,22	4343,80	500	15,60	1500	750000	7500000

23	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	15960	222,22	4566,02	350	0,00	1500	525000	5250000
24	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	21347	222,22	4788,24	350	1,43	1500	525000	5250000
25	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	103959	222,22	5010,47	600	23,36	1500	900000	9000000
26	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	98609	222,22	5232,69	600	21,94	1500	900000	9000000
27	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	98082	222,22	5454,91	600	21,80	1500	900000	9000000
28	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	98082	222,22	5677,13	600	21,80	1500	900000	9000000
29	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	98082	222,22	5899,36	600	21,80	1500	900000	9000000
30	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	94051	222,22	6121,58	600	20,73	1500	900000	9000000
31	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	94051	222,22	6343,80	600	20,73	1500	900000	9000000
32	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	99137	222,22	6566,02	600	22,08	1500	900000	9000000
33	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	98421	222,22	6788,24	600	21,89	1500	900000	9000000
34	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	95633	222,22	7010,47	600	21,15	1500	900000	9000000
35	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	95633	222,22	7232,69	600	21,15	1500	900000	9000000
36	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	100191	222,22	7454,91	600	22,36	1500	900000	9000000
37	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	97404	222,22	7677,13	600	21,62	1500	900000	9000000
38	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	97404	222,22	7899,36	600	21,62	1500	900000	9000000
39	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	97856	222,22	8121,58	600	21,74	1500	900000	9000000
40	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	97856	222,22	8343,80	600	21,74	1500	900000	9000000
41	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	91264	222,22	8566,02	600	19,99	1500	900000	9000000
42	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	107048	222,22	8788,24	600	24,18	1500	900000	9000000
43	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	17430	222,22	9010,47	350	0,39	1500	525000	5250000
44	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	36340	222,22	9232,69	350	5,41	1500	525000	5250000
45	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	108479	222,22	9454,91	600	24,56	1500	900000	9000000
46	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	108479	222,22	9677,13	600	24,56	1500	900000	9000000
47	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	117181	222,22	9899,36	600	26,87	1500	900000	9000000
48	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	114544	222,22	10121,58	600	26,17	1500	900000	9000000
49	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	120797	222,22	10343,80	600	27,83	1500	900000	9000000

50	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	112811	222,22	10566,02	600	25,71	1500	900000	9000000
51	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	115260	222,22	10788,24	600	26,36	1500	900000	9000000
52	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	115825	222,22	11010,47	600	26,51	1500	900000	9000000
53	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	112246	222,22	11232,69	600	25,56	1500	900000	9000000
54	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	129311	222,22	11454,91	600	30,09	1500	900000	9000000
55	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	118424	222,22	11677,13	600	27,20	1500	900000	9000000
56	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	120609	222,22	11899,36	600	27,78	1500	900000	9000000
57	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	118499	222,22	12121,58	600	27,22	1500	900000	9000000
58	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	118499	222,22	12343,80	600	27,22	1500	900000	9000000
59	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	113979	222,22	12566,02	600	26,02	1500	900000	9000000
60	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	126523	222,22	12788,24	600	29,35	1500	900000	9000000
61	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	118160	222,22	13010,47	600	27,13	1500	900000	9000000
62	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	118160	222,22	13232,69	600	27,13	1500	900000	9000000
63	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	118160	222,22	13454,91	600	27,13	1500	900000	9000000
64	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	116653	222,22	13677,13	600	26,73	1500	900000	9000000
65	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	116653	222,22	13899,36	600	26,73	1500	900000	9000000
66	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	123434	222,22	14121,58	600	28,53	1500	900000	9000000
67	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	98383	222,22	14343,80	600	21,88	1500	900000	9000000
68	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	117934	222,22	14566,02	600	27,07	1500	900000	9000000
69	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	117934	222,22	14788,24	600	27,07	1500	900000	9000000
70	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	117934	222,22	15010,47	600	27,07	1500	900000	9000000
71	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	117934	222,22	15232,69	600	27,07	1500	900000	9000000
72	10,0	6790,09	9170,39	80,00	0,00	80,00	80,00	53932	222,22	15454,91	400	10,08	1500	600000	6000000